

# Jahresbericht 2016/2017

des

Institutes für Elektrische Energietechnik  
und Energiesysteme





## **Inhaltsverzeichnis**

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| 0   | Vorwort   | 1   |
| 1   | Lehre   | 4   |
| 1.1 | Vorlesungen   | 4   |
| 1.2 | Übungen, Praktika, Mentoring  | 7   |
| 1.3 | Seminarvorträge   | 9   |
| 1.4 | Studien-, Bachelor-Diplom- und Masterarbeiten   | 11  |
| 2   | Veröffentlichungen, Dissertationen, Habilitationen  | 26  |
| 2.1 | Zeitschriften- und Tagungsaufsätze, Patente /- anmeldungen  | 26  |
| 2.2 | Vorträge / Seminare   | 29  |
| 2.3 | Geförderte Forschungsvorhaben   | 30  |
| 2.4 | Veranstaltungen, Exkursionen, Gastaufenthalte   | 31  |
| 3   | Forschungsarbeiten + Forschungsgebiete des Institutes   | 34  |
| 3.1 | Ausbau der Institutseinrichtungen   | 34  |
| 3.2 | Projektblätter  | 34  |
| 4   | Personelle Besetzung  | 121 |
| 4.1 | Hauptamtliche Mitarbeiter des Instituts   | 121 |
| 4.2 | Honorarprofessuren und Lehrbeauftragte  | 126 |
| 4.3 | Wissenschaftliche Hilfskräfte   | 126 |
| 4.4 | Mitgliedschaften in wissenschaftlichen Vereinigungen und in den<br>Selbstverwaltungsgremien der Universität | 127 |
| 5   | Links   | 128 |
| 6   | Anlagen   | 128 |



## **0 Vorwort**

### Identität und Wandel an der TU Clausthal und dem IEE

Liebe Freunde und Förderer des Institutes,

die Institutsleitung legt mit diesem Bericht, der die laufende Nr. 27/28 trägt, den 28. Jahresbericht des IEE vor. Seit Beginn der Berichterstattung sind 28 Dienstjahre des Institutsdirektors vergangen und sein Dienstende steht in absehbarer Zukunft bevor.

Was kann die Zukunft bringen? Fangen wir beim Wandel der TUC an. Die TU Clausthal hat sich in den zurückliegenden 28 Jahren aufgrund von Sparmaßnahmen des Landes Niedersachsen erheblich gewandelt. Im Jahre 1990 hatte die TUC noch sieben Fachbereiche, die in zwei Fakultäten organisiert waren. Die Fachbereiche Mathematik und Informatik, Physik, Chemie und Geowissenschaften hatten sich in der Mathematik-Naturwissenschaftlichen Fakultät I zusammengefunden. Die Fachbereiche Bergbau und Rohstoffe, Metallurgie und Werkstoffwissenschaften, Maschinen- und Verfahrenstechnik gehörten der Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Maschinenwesen an. Insgesamt hatte die TUC rd. 120 Professuren; heute gibt es noch 80 Professuren, die den drei Fakultäten für Natur- und Materialwissenschaft, Energie- und Wirtschaftswissenschaften und Mathematik/Informatik und Maschinenbau mit angehören. Zusätzlich gibt es vier Forschungszentren für Energieforschung (EFZN), Materialwissenschaften (CZM), Simulationswissenschaften (SWZ) und Umwelttechnik (CUTEC). Diese Forschungszentren sollen die vier Forschungsschwerpunkte

- 1.) Nachhaltige Energiesysteme
- 2.) Neue Materialien und Prozesse
- 3.) Offene Cyberphysische Systeme und
- 4.) Rohstoff und Recycling

spiegeln, die in dem auch vom Ministerium verabschiedeten Masterplan des Jahres 2016 festgeschrieben wurden. Sie sollen die in den Instituten vorhandenen disziplinären Forschungseinrichtungen und die in den vier Zentren gebündelten fachübergreifenden Infrastrukturen nutzen. Offen ist noch die professorale Ausstattung der Forschungsschwerpunkte mit den sie tragenden Instituten. Die vom Wissenschaftsministerium eingeschalteten Gutachter haben die Berufungs-

vorschläge des Präsidiums bisher nicht nachvollziehen können (oder wollen?). Es bleibt daher abzuwarten, wie dieser Neustrukturierungsprozess der TUC, der ja im wesentlichen durch die Festlegung der künftigen Denomination der freiwerdenden Professuren gesteuert werden kann, verläuft. Die fachliche Identität der “neuen” TUC ist nach dem Ende der NTH seitens der TUC durch die Festlegung der zukünftigen Forschungsschwerpunkte in einem langwierigen “Bottom up-Prozess” bereits definiert worden, aber wie so oft im Leben entscheiden nicht die eigenen Wünsche, sondern die zur Verfügung gestellten Ressourcen und Finanzmittel der Landesregierung sowie die jeweilige “Länge des Hebelarms” der Kontrahenten. Die Idee des Fachministeriums in Hannover ist es dabei, die TUC nach dem Ende der NTH (vgl. letzter Jahresbericht) als eigenständige kleinere Universität so aufzustellen, dass die zur Verfügung stehenden Finanzmittel (rd. 60 Mio/p.a.) so “effizient” eingesetzt werden, dass die TUC auch in Zukunft national und international konkurrenzfähig bleibt. Ob und wie das bei vier Forschungsschwerpunkten gelingt, bleibt offen und ist abhängig von der jeweiligen Sichtweise der Beteiligten: Bottom-up oder Top-down? Vermutlich läuft es aber wieder einmal auf einen wie auch immer gearteten Kompromiss hinaus. Wie dieser aussieht, bleibt abzuwarten.

Was folgt nun daraus für das IEE? In Zeiten des Wandels sollte die eigene Identität bekannt und konsolidiert sein, um nicht von der Außenwelt in Frage gestellt zu werden. Wir vom IEE können als eines der zwei TUC-Institute, die Energie im Institutsnamen tragen, mit Fug und Recht behaupten, dass wir im Forschungsschwerpunkt Nachhaltige Energiesysteme zukunftsorientiert aufgestellt sind:

## Lehre

- Wir sind eine tragende Säule in den Studiengängen Energietechnologien und Energiesystemtechnik und zukünftig auch
- im BA-Studiengang Elektrotechnik (voraussichtlicher Beginn ab WS 18/19),

## Forschung

- wir verkörpern im Schwerpunkt Nachhaltige Energiesysteme ein Kerninstitut und in den
- Energieforschungsinstituten der TU Clausthal und Niedersachsen (EFZN) in Goslar mit den Forschungsgruppen (vgl. nachfolgender Bericht)
  - Elektrische Energiesysteme
  - Leistungsmechatronik
  - Elektrische Energiespeichersysteme mit der assoziierten Abteilung

- Energiesystemintegration der CUTEC und der Arbeitsgruppe
- Nichtelektrische Energiesysteme (z. B. Powertax) geführt von Prof. Faulstich (ab 01/2018)

einen ausgewiesenen Arbeitsschwerpunkt. Die aufgelistete Struktur, die sich in den letzten Jahrzehnten Bottom-up durch einschlägige Aktivitäten in Forschung und Lehre herausgebildet hat (vgl. Jahresberichte seit 1990) ist in der erfolgreichen Evaluation des Energieforschungszentrums Niedersachsen in Goslar mit dem Erscheinen des öffentlichen Evaluationsberichtes ([www.efzn.de/fileadmin/Presse/Evaluation/WKN\\_Evaluation\\_CUTEC\\_EFZN\\_TUCL\\_161118.pdf](http://www.efzn.de/fileadmin/Presse/Evaluation/WKN_Evaluation_CUTEC_EFZN_TUCL_161118.pdf)) positiv begutachtet worden. Offen ist noch die Frage, inwieweit die vier genannten IEE-Arbeitsgruppen durch drei neu zu berufende Professuren strukturbildend langfristig verstetigt werden können. Fakt ist, dass die derzeit bestehende Kernprofessur

- Grundlagen der Elektrotechnik und Elektrische Energietechnik (Nachfolge Beck) wieder besetzt werden soll und muss, um die Lehre weiterhin zu bedienen. Eine zweite hauptamtliche W3-Professur für Elektrische Energiespeichersysteme ist zumindest im verabschiedeten Masterplan für den Schwerpunkt Nachhaltige Energiesysteme festgeschrieben und wird wohl von den Gutachtern nicht in Frage gestellt.

Eine dritte Professur für die Nachbesetzung der vor kurzem durch die wohlverdiente Beförderung von Herrn Dr. Wehrmann zum wissenschaftlichen Direktor eingerichtete Abteilung für Elektrische Energiesysteme ist zumindest strukturell auch in der neuen, vom Präsidium genehmigten, Institutsordnung des IEE vorhanden. Ob und wann sie mit einem W2-Professor besetzt werden kann, hängt vom Abschluss des beschriebenen Wandlungsprozesses der TUC ab. Die fachlichen Weichen für eine positive Gutachterentscheidung sind zumindest aus IEE Sicht, hierfür zielführend gestellt. Wenn die TUC sich bewegen möchte: wir wandeln gerne mit. Das soll auch der vorgelegte Jahresbericht 2016/2017 zeigen.

Glück auf!

Univ.-Prof. Dr.-Ing. H.-P. Beck

# **1 Lehre**

## **1.1 Vorlesungen**

Die Studentenzahlen sind in den zurückliegenden zwei Jahren zurückgegangen (derzeit rd. 4400 Studierende). Im Mittel gibt es am IEE pro Jahr trotzdem immer noch knapp 1000 Studierende im Grundstudium und 1000 im Fachstudium. Die Zahl der fortgeschrittenen Studierenden resultiert aus den vielen Wahlpflichtfächern, die vom haupt- und nebenamtlichen Lehrpersonal angeboten werden. Insbesondere den Lehrbeauftragten und den Honorarprofessoren des IEE sei an dieser Stelle für die erbrachte Lehrleistung wieder einmal herzlich gedankt. Ein wissenschaftlicher Studiengang Energietechnologien (BA) und Energiesystemtechnik (MA), wie der am IEE, wäre ohne diese Expertise der externen Lehrkräfte nicht einschlägig. Das gilt auch für den geplanten Bachelorstudiengang Elektrotechnik (Beginn voraussichtlich ab WS 2018/2019). Ich hoffe, dass dies auch die Gutachter der bevorstehenden Akkreditierung des Studienganges Elektrotechnik so sehen und für den Start des Studienganges Elektrotechnik grünes Licht geben.

Darüber hinaus liegt nun der Abschlussbericht der Evaluation der Energieforschung der TUC/EFZ, des EFZN und der CUTEC vor. Das Ergebnis ist veröffentlicht und kann unter der Internetadresse: [www.efzn.de/fileadmin/Presse/Evaluation/WKN\\_Evaluation\\_CUTEC\\_EFZN\\_TUCL\\_161118.pdf](http://www.efzn.de/fileadmin/Presse/Evaluation/WKN_Evaluation_CUTEC_EFZN_TUCL_161118.pdf) abgerufen werden. Das Ergebnis in Noten ausgedrückt lautet: EFZN Note gut, TUC Note befriedigend und CUTEC Note ausreichend. Die Konsequenzen daraus wurden teilweise im Vorwort beschrieben.

Die “Renner” in der Lehre (gemessen an den Studentenzahlen) sind, wie man der folgenden Tabelle entnehmen kann, die Fächer

- Grundlagen der Elektrotechnik
- Elektrizitätswirtschaft
- Leistungsmechatronische Systeme
- Regenerative Energiequellen

Sie tragen 3/4 der Studierendenzahlen. Ähnliches gilt für die dazugehörigen Übungen. Was die Promotionen angeht, gab es einen Stau in den Jahren 2015/2016, was dazu geführt hat, dass in den Folgejahren im Schnitt pro Jahr 4 Promotionsprüfungen anstehen. Im Berichtszeitraum wurden 3 getätigt. Dies ist immer noch erfreulich, denn der Schnitt an der TUC ist bei nur einer Promotion pro Professor und Jahr. Die Zahlen im IEE könnten noch höher sein, leider schaffen aber 1/3 der Assistenten ihren Promotionsabschluss nicht während der Universitätszeit.



|                                  |  | <b>2016</b> | <b>2017</b> |
|----------------------------------|--|-------------|-------------|
| Beck/Wehrmann                    | Grundlagen der Elektrotechnik I/II (W 8800 / S 8801)                   | 720         | 547         |
|                                  | Elektrotechnik für Ingenieure I/II (W8800 / S 8801)                    | 470         | 538         |
| Beck/Turschner                   | Elektrische Energietechnik (S 8803)                                    | 69          | 39          |
| Beck/Turschner                   | Regelung Elektrischer Antriebe (W 8808)                                | 10          | 24          |
| Beck                             | Energieelektronik (W 8811)   | 39          | 19          |
| Beck/Turschner<br>u. a.          | Energiesysteme (W 8804)  | 168         | 110         |
| Heldt                            | Sonderprobleme Elektrischer Maschinen (W 8805)                         | 19          | 23          |
| Beck/Wehrmann                    | Elektrische Energieverteilung (W 8812)                                 | 35          | 30          |
| Beck/Wehrmann                    | Elektrische Energieerzeugung (S 8815)                                  | 30          | 42          |
| Beck/Turschner                   | Leistungmechatronische Systeme (S 8826)                                | 66          | 76          |
| Turschner                        | Leistungmechatronische Regelungssysteme                                | -           | -           |
| Jahn                             | Regenerative Elektrische Energietechnik (W 8818)                       | 38          | 31          |
| Maubach                          | Elektrizitätswirtschaft (S 8819)                                       | 139         | 105         |
| Baake                            | Theorie Elektromagnetischer Felder (S 8817)                            | 35          | 40          |
| Wenzl<br>Benger<br>(ab WS 16/17) | Batteriesystemtechnik und Brennstoffzellen (W 8816)                    | 26          | 14          |
| Faulstich                        | Dyn. Systeme in Natur, Technik und Gesellschaft<br>(S 8825)            | 20          | 30          |
| Lülf                             | Optimierung und Instandhaltung von Elektroenergie-<br>anlagen (S 8828) | 26          | 20          |
| Kühl                             | Regenerative Energiequellen (W 8830)                                   | 88          | 56          |
| Beck/<br>Darrelmann              | Autonome Netze (W 8832)  | 20          | 12          |
| Buddenberg                       | Fossile und regenerative Energieressourcen (W 8831)                    | 52          | 33          |

Insgesamt fanden im Verlauf des Berichtszeitraums 1886 Bachelor- und Masterprüfungen statt, die von den prüfungsberechtigten Hochschullehrern, Honorarprofessoren und Lehrbeauftragten des Institutes abgenommen wurden. Alle sind Prüfungen im Haupt- bzw. Fachstudium (5.-10. Semester). Der guten Tradition der TUC entsprechend wurden diese Prüfungen mündlich

bzw. halbschriftlich abgenommen. Mündliche Prüfungen sind im Gegensatz zu Klausuren auch Lehrveranstaltungen, weil eine Interaktion und Kommunikation zwischen Prüfer und Prüfling stattfindet, die darüber hinaus auch eher der Situation der späteren Berufswelt entspricht. Da diese Prüfungsform des reinen Gespräches aus Kapazitätsgründen nicht immer vollständig eingehalten werden kann, gibt es u. a. im Praktikum „Grundlagen der Elektrotechnik I, II“ nach wie vor ein mündliches Vortestat (Quickie) mit einem vorgeschalteten schriftlichen Fragenteil zur Messung der Vorleistung der PraktikumssteilnehmerInnen.

Ein Problem in den ersten Semestern sind die sinkenden Eingangsqualifikationen der Abiturienten. Hier wird seitens des Institutes mit Sondermitteln der Fakultät durch zusätzliche Angebote (Vorkurse, Klausuraufgaben-Übungen in den Vorlesungen, mehr Zeit für die Klausurbearbeitung bei gleichem Schwierigkeitsgrad etc.) entgegen gewirkt.

Der Schwerpunkt der IEE-Lehrleistung liegt nach wie vor in den angebotenen Kursen Grundlagen der Elektrotechnik I, II. Folgende Studiengänge der Fakultäten I, II und III nutzen das Angebot:

- Energie und Rohstoffe
- Energietechnologien
- Maschinenbau
- Materialwissenschaft und Werkstofftechnik
- Technische Informatik
- Verfahrenstechnik/Chemieingenieurwesen
- Wirtschaftsingenieurwesen

Im Rahmen des Fachstudiums können die entsprechenden Lehrangebote des IEE in den folgenden Studiengängen als Pflicht-, Wahlpflicht- und Schwerpunktfach genutzt werden. Die Anzahl der Teilnehmer gehen aus den gezeigten Tabellen hervor :

- Maschinenbau, Studienschwerpunkt “Mechatronik”
- Energietechnologien (BA)
- Energiesystemtechnik (MA/FH-Absolventen)
- Wirtschaftsingenieurwesen, Studienrichtung Rohstoffe und Energie
- Energie- und Materialphysik

Die relativ hohen Studierendenzahlen in der Vorlesung Leistungsmechatronische Systeme (66/76) sind auf die Umstellung des Lehrangebotes im Fach zurückzuführen.

Für Mechatronikanlagen größerer Leistung ( $> 10 \text{ kW}$ ) haben wir den Begriff “Leistungsmechatronik” geprägt und zwar in Analogie zur Elektronik/Leistungselektronik. Leistungsmechatronik enthält als Kerngebiete Leistungselektronik, Antriebstechnik, Regelungstechnik und

Technische Informatik; sie ist damit ein Gebiet der (elektrischen) Energiesystemtechnik. Sie unterscheidet sich von der bisherigen Antriebstechnik durch die noch weiter ausgedehnten Gebiete: mathematische Modellbildung, Simulation und Validierung. So ist z. B., wie in einem laufenden Forschungsprojekt, auch die Dynamik des Windangebotes einer Windenergieanlage inklusive der elektrischen Generatortechnik mit Regelung Teil des Gesamtmodells, weil nur durch diese Weiterfassung der Systemgrenzen die Selbsterregungseffekte im Antriebsstrang beherrscht werden können.

Neben der Leistungsmechatronik gehören die regenerative dezentrale elektrische Energietechnik und die Speichersysteme mit Elektroenergie-Zugang zu den Arbeitsgebieten des IEE, und zwar in Forschung und Lehre. Das gesamte Arbeitsgebiet wird unter dem Begriff Elektrische Energiespeichersysteme als Teil des grundständigen MA-Studienganges Energiesystemtechnik zusammengefasst. Hierfür ist eine neue Professur im Masterplan der TU Clausthal vorgesehen (vgl. Vorwort).

## 1.2 Übungen, Praktika, Mentoring

Im Berichtszeitraum wurden folgende Übungen und Praktika durchgeführt. Die Zahlen geben jeweils die geschätzte Teilnehmerzahl an.

|             |   | <b>2016</b> | <b>2017</b> |
|-------------|---|-------------|-------------|
| Große Übung | Grundlagen der Elektrotechnik I/II<br>(Wehrmann/Ufkes/Spielmann)                  | 65          | 90          |
| Tutorien    | Grundlagen der Elektrotechnik I/II<br>(Wehrmann/Oberland/Kreth/wiss. Hilfskräfte) | 593         | 286         |
| Übung       | Elektrische Energietechnik<br>(Turschner/Werther/Fiebrich/Lin)                    | 69          | 39          |
| Übung       | Regelung Elektrischer Antriebe<br>(Turschner)                                     | 10          | 24          |
| Übung       | Leistungsmechatronische Systeme<br>(Turschner)                                    | 66          | 76          |

|       |  | <b>2016</b> | <b>2017</b> |
|-------|--|-------------|-------------|
| Übung | Leistungsmechatronische Regelungssysteme<br>(Turschner)                                  | -           | -           |
| Übung | Energieelektronik<br>(Bentaleb/Schwake/Turschner)  | 39          | 19          |
| Übung | Elektrische Energieerzeugung<br>(Wehrmann/Werther)                                       | 65          | 42          |
| Übung | Elektrische Energieverteilung<br>(Schnieder/Ufkes/Tkalcec)                               | 61          | 30          |
| Übung | Batteriesystemtechnik und Brennstoffzellen<br>(Wenzl/Beushausen/Oberland)                | 61          | 14          |
| Übung | Regenerative Elektrische Energietechnik<br>(Jahn)  | 38          | 31          |
| Übung | Theorie der elektromagnetischen Felder<br>(Baake)  | 35          | 40          |
| Übung | Sonderprobleme elektrischer Maschinen<br>(Heldt)   | 19          | 23          |
| Übung | Dyn. Systeme in Natur, Technik und Gesellschaft<br>(Faulstich/zum Hingst/Hashemifar zad) | 20          | 30          |
| Übung | Optimierung und Instandhaltung von Elektroenergieanlagen<br>(Lülf)                       | 26          | 20          |
| Übung | Regenerative Energiequellen<br>(Kühl)  | 88          | 56          |
| Übung | Autonome Netze<br>(Darrelmann)   | 20          | 12          |
| Übung | Fossile und regenerative Energieressourcen<br>(Buddenberg)                               | 52          | 33          |
| Übung | Elektrizitätswirtschaft<br>(Koring)  | 139         | 105         |

|                       |   | <b>2016</b> | <b>2017</b> |
|-----------------------|---|-------------|-------------|
| Praktika              | Grundlagen der Elektrotechnik I/II<br>(Wehrmann/Ufkes/wiss. Hilfskräfte)                            | 615         | 687         |
| Praktikum             | Hochspannungstechnik<br>(Wehrmann)  | 16          | 8           |
| Praktikum             | Energieelektronik<br>(Bentaleb/Gollenstede)   | 4           | 9           |
| Praktikum             | Elektrische Energiespeicher<br>(Oberland/Tchoupou Lando)  | 26          | 10          |
| Praktikum             | Regenerative Elektrische Energietechnik<br>(Heyne/Ufkes/Tkalcec)                                    | 25          | 21          |
| Praktikum             | Elektrische Maschinen<br>(Turschner/Gollenstede/Tchoupou Lando/Deblon)                              | 16          | 3           |
| Grundpraktikum        | Ingenieurwissenschaft im Bachelor Energietechnologien<br>(Turschner/Gollenstede/Deblon)             | 15          | 10          |
| Grundpraktikum        | Maschinenbau<br>(Turschner/Gollenstede/Deblon)  | 16          | 10          |
| Gemeinschafts-seminar | Gemeinschaftsseminar zur Elektrischen Energietechnik und Energiesystemtechnik<br>(Koring/Schnieder) | 12          | 7           |

### 1.3 Seminarvorträge

#### 2016

|                   |  |
|-------------------|--|
| Bösenberg, Moritz | Wellenkraftwerke   |
| Strauß, Vanessa   | Deutsche CO2-Vermeidungsziele im internationalen Kontext |
| Lange, Helma      | PV-Hausspeichersysteme                                   |
| Perret, Lukas     | Thermische Kraftwerke                                    |
| Chafi, Leo        | Second Life Konzepte in Deutschland und Amerika          |

|                           |  |
|---------------------------|--|
| Dannewitz, Florian        | Kommerziell verfügbare SmartHome-Lösungen  |
| Föppl, Tilman             | Bereitstellung von Systemdienstleistungen in Stromnetzen mit steigendem Anteil erneuerbarer Energien |
| Schreiber, Justin Lennard | Entwicklung und energiewirtschaftliche Effekte des Selbstverbrauchs von eigenerzeugtem Strom         |
| Wagner, Artur             | Zuschaltbare Lasten  |
| Tillmanns, Marcus         | Elektrobuskonzepte (Projekte) in Deutschland   |
| Park, Eun Sun             | Risiken bei falscher Anwendung eines BMS (Battery Management System) an Li-Batterien                 |
| Tillmanns, Alexander      | Netzanschlussbedingungen für Erzeugungsanlagen an Mittel- und Niederspannungsnetzen                  |

## **2017**

|                             |  |
|-----------------------------|--|
| Muth, Philipp Geronimo      | Sicherheit von Kernkraftwerken   |
| Holm, Matthias              | Grundlagen und Wirkungsweise von Virtual-Synchronous-Generator (VSG)-Invertersystemen                        |
| Kemmer, Clemens             | 24-hours ahead short term load forecasting   |
| Heek, Moritz                | Polygeneration energy systems - Optimization of operational strategy   |
| George, Jan Frederick       | Analyse der konventionellen Mindesterzeugung   |
| Gröne, Marcel               | Variable Stromtarife zur Steuerung der Nachfrage   |
| Settgast, Thorben           | Hochspannungsgleichstromübertragung: Leistungselektronische Entwicklungen und Einsatz der HGÜ in Deutschland |
| Hanse, Hannes               | Die Notwendigkeit der Sektorkopplung zur Erreichung der Klimaschutzziele                                     |
| Proschwitz, Miguel          | Lithium-Plating  |
| Girlich, Christina          | Second-Life-Konzepte für Lithium-Ionen-Batterien   |
| Marcinczak, Lena            | Sicherheitsmaßnahmen beim Einsatz einer Li-Batterie in der Elektromobilität                                  |
| Ostrowski, Michelle-Désirée |  |

|                     |  |
|---------------------|--|
| Schulz, Marlon      | Vergleich von konduktiver und induktiver Ladung  |
| Fischer, Lars Henry | Influence of Electromobility on the future standard load profiles                                |
| Seiler, Christoph   | Elektromobilität in Deutschland  |
| Struck, Torben      | Zukünftige Mobilität - Nachhaltigkeitsbetrachtung von Elektrofahrzeugen                          |
| Pollmanns, Arno     | Diskussion um atomare Endlager in Deutschland  |
| Hamann, Kevin       | Entwicklung der EE und konventioneller Kraftwerkseinsatz nach der atomaren Havarie in Japan 2011 |
| Kerl, Falko         | Alterungsmodelle auf unterschiedlichen Größen- und Zeitskalen für Batteriezellen                 |

## **1.4 Studien- , Bachelor, Diplom- und Masterarbeiten**

### **Studien- und Bachelorarbeiten**

**2016**

|                              |  |
|------------------------------|--|
| Pätzmann, Lisa               | Wirtschaftlicher Vergleich verschiedener Konzepte zur Erhöhung der Eigenverbrauchsquote in privaten Haushalten mit PV-Anlagen<br>Betreuer: Prof. Wenzl, Prof. Beck, Dipl.-Ing. Spielmann |
| Cifuentes Waidelich, Alan C. | Theoretische Grundlagen der modernen Halbleiterbauelemente aus Siliziumkarbid<br>Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Beck   |
| Brosig, Nils Jonathan        | Literaturrecherche, Leistungsmessung und Potentialabschätzung einer selbstschaltenden Wechselstrommaschine<br>Betreuer: Dr. Turschner, Dr. Wehrmann                                      |

|                    |  |
|--------------------|--|
| Sturm, Arthur      | Wirtschaftliche Betrachtung von Energie- und Speicherkonzepten bei Photovoltaikanlagen<br>Betreuer: Prof. Wenzl, Dr. Turschner, Dr. Benger   |
| Yacoubi, Mekki     | Identifikation der thermischen Verlustparameter einer Gleichstrommaschine<br>Betreuer: Dr. Turschner   |
| Koch, Sabine Toni  | Untersuchung der Maschinenschwingungen an einem Mühlenluftgebläse<br>Betreuer: Dr. Turschner   |
| Scherke, Gert      | Simulationsgestützte Analyse von ZVS-Wandlern zur Verbesserung des Wirkungsgrades bei hohen Schaltfrequenzen<br>Betreuer: Prof. Beck, Dr. Turschner, Dipl.-Ing. Bentaleb                       |
| Hofheinz, Jonas    | Gestaltung und Untersuchung eines auf flexiblen Gaskraftwerken und dualen Wärmesystemen beruhenden Energieversorgungssystems<br>Betreuer: Prof. Wenzl, Dr. Wehrmann                            |
| Klaas, Christoph   | Anforderungen an den Kraftwerkspark bei großer installierter EE-Leistung<br>Betreuer: Prof. Wenzl, Dr. Wehrmann, Dipl.-Ing. Spielmann  |
| Büttner, Christian | Komplettsanierung eines Fachwerkhauses zum KfW-Effizienzhaus-Denkmal, Konzepterstellung und Entwurf<br>Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Kühl   |
| Hunger, Dennis P.  | Auswertung der Batteriedaten eines Brennstoffzellen-Batterie-Hybridschiffs unter Einbeziehung analytischer Methoden der Betriebsfestigkeit<br>Betreuer: Prof. Wenzl, Dipl.-Ing. Tchoupou Lando |



|                     |   |
|---------------------|---|
| Wagner, Mathias     | Analyse und Deutung sich ergebender Last- und Erzeugungsprofile bei Haushalten mit dezentralen Energiewandlungsanlagen anhand vorhandener Messdaten<br>Betreuer: Dr. Wehrmann, Prof. Siemers (IPP),<br>Dipl.-Ing. Schnieder |
| Jordan, Steffen     | Power-to-Steam<br>Anwendung von Power-to-Heat in der Prozessindustrie<br>Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Beck, Dipl.-Wi.-Ing. Ryspaeva,<br>Dipl.-Ing. Yilmaz, Ahmels, M. A.  |
| Kunz, Karl-Kristian | Entwicklung eines Batteriemanagementsystems für eine LiFePO <sub>4</sub> -Fahrzeug-Batterie<br>Betreuer: Dr. Turschner  |
| Kunz, Karl-Kristian | Entwicklung eines Messsystems zur hochdynamischen Kraftmessung für die Technikanalyse und Leistungssteigerung im Kampfsport<br>Betreuer: Dr. Turschner  |
| Turhal, Gökhan      | Die Bedeutung der Bereitstellung von Momentanreserve in zukünftigen Netzen mit hohem Anteil an regenerativer Erzeugung<br>Betreuer: Prof. Beck, Dr. Wehrmann, Dr. Turschner   |
| Orgel, Dominik      | Auslegung und Konstruktion eines multiaxialen Beanspruchungsstandes für befüllte Geozellen<br>Betreuer: Dr. Meyer (IGMC), Dr. Turschner   |
| Lensing, Max        | Inhomogenitäten der Stromverteilung in einer PEM Brennstoffzelle<br>Betreuer: Prof. Wenzl, Dr. Heyne  |
| Petcha, Christien   | Beschreibung der ausbalancierenden Verfahren eines Batteriemanagementsystems<br>Betreuer: Prof. Wenzl, Dipl.-Ing. Tchoupou Lando  |

|                    |  |
|--------------------|--|
| Frink, Elisa       | Verlustberechnung beim Einsatz unterschiedlicher Technologien zur Spannungshaltung<br>Betreuer: Dr. Wehrmann, Prof. Beck, Dipl.-Ing. Schnieder, Dipl.-Ing. Schwake                 |
| Chebbi, Aymen      | Design und Implementierung von Berechnungsketten zur Ermittlung des Windenergie-Potentials Niedersachsens in MATLAB/Simulink<br>Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Siemers (IfI)       |
| Margies, Jan Pedro | Anforderungen an dezentrale Energiesysteme im Inselbetrieb<br>Betreuer: Dr. Wehrmann, Prof. Beck   |
| Kruse, Ulrike      | Bereitstellung von Kurzschlussleistung durch die virtuelle Synchronmaschine<br>Betreuer: Dr. Wehrmann, Prof. Beck  |
| Wu, Xiaolong       | Erzeugung und Anwendung von synthetischen Haushaltslastprofilen<br>Betreuer: Prof. Wenzl   |
| Grodde, Florian    | Verfahrenstechnische und werkstofftechnische Untersuchungen zum Induktionshärten von Schneidelementen<br>Betreuer: Prof. Wesling (ISAF), Prof. Beck, Dr. Echtermeyer (O.E.M. GmbH) |
| Griemert, Rudolf   | Ansteuerung eines IGBT-Wechselrichters durch Raumzeigermodulation<br>Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Bohn (IEI)   |

**2017**

|              |  |
|--------------|--|
| Busche, Lisa | Messtechnische und theoretische Evaluierung photovoltaisch-thermischer Solarkollektoren mit lösbarer Verbindung von PV-Modul und Wärmeübertrager<br>Betreuer: Prof. Beck, Prof. Weber (ISFH) |
|--------------|--|

|                                 |  |
|---------------------------------|--|
| Mürmann, Laura                  | Klassifizierung der Rotorblattvereisung an Windenergieanlagen<br>Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Beck, Dr. Runge (Nordex SE)  |
| Hoppe, Jonas                    | Brennstoffzufuhr für eine automobilen Brennstoffzelle - konstruktive Gestaltung unter Berücksichtigung von Luftfilter, Befeuchter und Druckanforderungen<br>Betreuer: Prof. Wenzl, Dr. Wehrmann, Herr Stremlai (IAV) |
| Küthe, Daniel                   | Konzept für die Flexibilisierung von Biogasanlagen am Beispiel der Bioenergie Guntrup<br>Betreuer: Dr. Wehrmann, Prof. Schwindt (Wiwi), Dipl.-Ing. Spielmann   |
| Potthoff, Pascal                | Ermittlung von Membranenwiderständen für Vanadium Redox-Flow Batterien<br>Betreuer: Prof. Turek (ICVT), Prof. Wenzl, Frau Schafner, M. Sc. (ICVT)  |
| Er, Deniz                       | Simulation einer Kleinwindenergieanlage mit Asynchronmaschine im Generatorbetrieb<br>Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Beck   |
| Wichmann, Jascha                | Leistungssteigerung von Windenergieanlagen und ihr Potenzial, Deutschlands Klimaziele zu erfüllen<br>Betreuer: Dr. Prof. Beck  |
| Stelmaszyk, Henriette<br>Sophia | Analyse des Aufbaus und der Leckagesuche am Vakuumsystem eines in der Entwicklung befindlichen Schwungradspeichers<br>Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Wenzl, Dipl.-Ing. Tölg (Piller)                                 |
| Hückl, Rudolf                   | Maßnahmen zur Spannungshaltung in Niederspannungsnetzen<br>Betreuer: Dr. Wehrmann, Prof. Beck  |

|                               |   |
|-------------------------------|---|
| Köksaldi, Sibel               | Kennzahlen für die Niederspannungsnetzplanung<br>Betreuer: Dr. Wehrmann, Prof. Beck   |
| Jansen, Marcel                | Konzeptentwicklung eines Last- und Lademanagements als Bestandteil eines übergeordneten Leitsystems für den Einsatz von Elektrobussen der Hamburger Hochbahn AG<br>Betreuer: Dr. Benger, Prof. Beck, Herr Gollenstede, M. Sc., Herr Münster, B. Sc. (Hamburger Hochbahn AG) |
| Frohwerk, Jan-Markus          | Analyse, Vergleich und Bewertung der Klimaschutzszenarien für deutsche Bundesländer bis 2050<br>Betreuer: Prof. Faulstich, Prof. Beck, Dr. zum Hingt  |
| Reineke, Steven               | Modellbildung zur Bewertung verschiedener Betriebsstrategien für autarke Energiesysteme<br>Betreuer: Dr. Wehrmann, Prof. Beck, Dipl.-Ing. Oberland  |
| Xiao, Xipeng                  | Beschreibung und Simulation einer Synchronmaschine nach dem Modell von Trabelsi<br>Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Bohn (IEI)  |
| Tillmanns, Alexander Wilfried | Implementierung eines Labornetzes in einer Netzsimulationssoftware und Untersuchungen zu unterschiedlichen Netztopologien<br>Betreuer: Dr. Wehrmann, Prof. Beck , Kreth, M. Sc.   |
| Eqbal, Aslan                  | Designing economically sustainable mini-grid systemes - a case study form Tanzania<br>Betreuer: Prof. Beck, Dr. Wehrmann, Rohrer, M. Sc (Inensus)   |
| Jahn, Leonard                 | Entwicklung eines Kühlkonzeptes für den Akkumulator eines Formula Student Rennwagens<br>Betreuer: Prof. Wenzl, Dr. Benger, Dipl.-Ing. Oberland, Dip.-Ing. Muster (IEVB)   |

|                |   |
|----------------|---|
| Hamann, Kevin  | Aufbau eines Prüfstandes zur Untersuchung des Kurzschlussverhaltens von Lithium-Ionen Batterien<br>Betreuer: Prof. Beck, Dr. Schäfer (IMW), Dr. Benger, L. Beushausen, M. Sc.             |
| Meyfarth, Anna | Unterbrechungsfreie Stromversorgung von Krankenhäusern<br>Gegenüberstellung statischer und dieseldynamischer Systeme<br>Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Wenzl, Dipl.-Ing. Stodieck (Gnuse) |

### **Projektarbeiten**

#### **2016**

|                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| Schreiber, Winfried                 | Entwicklung eines Modells zur Simulation von Betriebsstrategien eines autonomen Energiesystems<br>Betreuer: Dr. Wehrmann, Dipl.-Ing. Oberland                                    |
| Wohlers, Carlos Antonio             | Vergleich zweier mathematische Modelle der Virtuellen Synchronmaschine (VISMA)<br>Betreuer: Dr. Turschner, Dr. Wehrmann, Dipl.-Wi.-Ing. Ryspaeva, Ahmels, M. A.                  |
| Winning, Frank                      | Fachpraktikum Hochspannungstechnik - Überarbeitung, Neustrukturierung & Erweiterung<br>Betreuer: Dr. Wehrmann  |
| Neesen, Jan                         | Normung von stationären Lithium-Ionen-Batterien<br>Betreuer: Dr. Turschner   |
| Klarmann, Mareike<br>Ivers, Monique | Untersuchung der Beanspruchungen eines doppeltgespeisten Asynchrongenerators im Antriebsstrang eines Pumpspeicherkraftwerks bei dynamischer Belastung<br>Betreuer: Dr. Turschner |

|   |  |
|---|--|
| Bai, Yinghe<br>He, Dun<br>Zhou, Fei         | Analyse von Betriebsdaten von Batterien in Fahrzeugen<br>Betreuer: Prof. Wenzl, Dipl.-Ing. Tchoupou Lando  |
| Tas, Rabia                                  | Realisierung eines neuen Leittechniksystems zur Erhöhung der Anlagenautomatisierung an einem Heizkraftwerk<br>Betreuer: Dr. Turschner, Dipl.-Ing. Postl (Energie AG Oberösterreich Wärme GmbH) |
| Hoang, Anh Cong                             | Technologische Beschreibung und Übersicht über die weltweite Verwendung von HGÜ-Übertragungsnetzen<br>Betreuer: Dr. Turschner  |
| Abdallah, Ahmed<br>Abouali Galehdari, Navid | Programmierung und Simulation bei Step 7<br>Betreuer: Dr. Turschner  |

## **2017**

|  |  |
|--|--|
| Maldonado Diaz, Adriana<br>Lucia                   | Introduction of Risk Based Maintenance in E.ON's Wind Operations<br>Betreuer: Dr. Turschner, Frau Eckhard (E.ON)                           |
| Becker, Lars<br>Sölter, Hendrik<br>Hamrahi, Pejman | Inbetriebnahme eines Rapid-Prototyping-Systems und Ausarbeitung eines Versuchs für das mechatronische Praktikum<br>Betreuer: Dr. Turschner |
| Sturm, Arthur                                      | Wirtschaftliche Betrachtung einer $\mu$ -Kraftwärmekopplungsanlage im Einfamilienhausbereich<br>Betreuer: Dr. Turschner                    |

|  |   |
|--|---|
| Yazji, Majd<br>Eleyat, Mohammed  | Simulation einer Photovoltaikanlage und Entwurf einer<br>Regelung zur maximalen Leistungsübertragung<br>Betreuer: Dr. Turschner   |
| Decker, Christian<br>Özbay, Mahir Ugur<br>Youssa, Serge<br>Baedeker, Konstantin              | Energiemanagementsystem einer Beispielregion<br>Betreuer: Dr. Wehrmann, Dipl.-Ing. Spielmann  |
| Fredershausen, Nicolas<br>Karnebogen, Mareike<br>Reinke, Mas                                 | Analyse von Maßnahmen zur Reduktion des Netzausbaus<br>unter Berücksichtigung zukünftiger Entwicklungen des<br>deutschen Stromnetzes und des geplanten Ausbaus erneuerbarer Energien  |
| Mba Wafo, Yves Anderson<br>Soh Mache, Astride Maurane  | Umsetzung verschiedener Synchronmaschinen-Modelle<br>für ein Rapid Prototyping System der Firma dSpace<br>Betreuer: Dr. Turschner   |
| Jiang, Mengying<br>Sun, Yue  | Brennwertrekonstruktion in einem Gasverteilnetz mit<br>unvollständiger Messinfrastruktur und dezentraler Biogaseinspeisung<br>Betreuer: Dr. Turschner   |
| Fries, Ann-Kathrin<br>Ilsen, Benjamin<br>Klaas, Christoph<br>Kreth, Nils                     | Allgemeine normative Anforderungen an ein Verfahren<br>zur Prüfung der Funktionalität und Sicherheit wiederaufladbarer Batterien zur Anwendung in stationären, dezentralen Energiespeichersystemen in Mittelspannungsnetzen<br>Betreuer: Dr. Benger |
| Njeyon Tchana, Joel Stephane<br>Njinga Feunkeu, Rodrigue<br>Tchamadeu Touko, Cedric<br>Herve | Aufbau und Funktionsweise von Windkraftanlagen<br>Betreuer: Dr. Turschner, Dipl.-Ing. Ufkes   |

**Diplom- und Masterarbeiten****2016**

|                          |   |
|--------------------------|---|
| Kiefer, Jörn             | Moore's Law für elektrische Energiespeicher und Energiewandlungssysteme mobiler Anwendungen<br>Betreuer: Prof. Wenzl, Dr. Turschner, Dipl.-Ing. Spielmann, Dipl.-Ing. Kiessling (P3 Automotive)   |
| Schmuland, Johannes      | Temperaturregelung einer Industriehalle<br>Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Beck, Dipl.-Ing. Skuratowicz (a3Ds GmbH)  |
| Söldner, Tassilo         | Resonanzverstärkte QEPAS-Systeme<br>Betreuer: Prof. Schade (IEPT), Prof. Beck   |
| Xia, Hailiang            | Bewertung des Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung-Systems des Energie-Forschungszentrum Niedersachsens<br>Betreuer: Prof. Beck, Dr. Turschner  |
| Erichsen, Wiebke         | Entwicklung eines Modells für die Nachweisführung der transienten Stabilität einer dezentralen Erzeugungseinheit in der Software Power Factory<br>Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Beck, Dipl.-Ing. Götze (M.O.E. GmbH), Dr. Zimmermann (M.O.E. GmbH) |
| Woo, Kyoung Seok         | Entwicklung von Steuerungs- und Antriebskonzepten zur Planung einer industriellen Fertigungsanlage<br>Betreuer: Dr. Turschner, Dr. Wehrmann, Dipl.-Ing. Berger (ELPRO Elektroanlagen Behncke GmbH)  |
| Swiatek, Lukasz          | Stand des Wissens zur Aufbereitung von Aschen aus Müllverbrennungsanlagen im Jahr 2014<br>Betreuer: Prof. Faulstich, Dr. Vogt (IFAD), Dr. Vodegel (CUTEC), Dipl.-Ing. Fedianina (CUTEC)   |
| Salimifard, Mohammadhadi | Parameterization of an Event-Oriented Lifetime Prediction Model for Li-ion Batteries<br>Betreuer: Prof. Wenzl, Prof. Beck, Dr. Bengler  |



|                         |   |
|-------------------------|---|
| Tkalcec, Karlo          | Optimierung der Energieflüsse und exergetische Analyse des Quarzwerke-Werkes am Standort Weferlingen unter besonderer Berücksichtigung von Erzeugungsanlagen mit Nutzung der Kraft-Wärme-Kopplung Photovoltaik<br>Betreuer: Dr. Wehrmann, Prof. Beck, Dr. Heyne |
| Hou, Baofeng            | Untersuchung des Leistungsverlaufs von wechselrichterbetriebenen Lasten und Verbesserung des Leistungsverlaufs bei Nutzung für leistungsautarke Inselnetze<br>Betreuer: Prof. Wenzl, Dr. Turschner  |
| Steinberg, Michael      | Feldorientierte Regelung von Asynchronmaschinen<br>Betreuer: Prof. Beck, Dr. Turschner  |
| Hahn, Matthias          | Umsetzung von Regelstrategien und Erweiterung des Prüfstandsmodells eines neuartigen Wellenkraftwerks<br>Betreuer: Dr. Turschner, Dr. Wehrmann, Dipl.-Ing. Schwake  |
| Harthun, Marcus         | Diskussion von Modellen und Implementierungen Virtueller Synchronmaschinen<br>Betreuer: Dr. Turschner, Dr. Wehrmann   |
| Stanisius, Markus       | Regelungstechnische Analyse und Inbetriebnahme einer eigenstabilisierten Trägerplattform für optronische Sichtgeräte<br>Betreuer: Prof. Kemnitz (IfI), Prof. Beck, Dr. Rehage (Jenoptik)  |
| Koch, Sabine Toni       | Untersuchung von erhöhten Maschinenschwingungen anhand einer Langzeitüberwachung<br>Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Beck, Herr Koch (Thiemann GmbH)  |
| El Hamzaoui, Abderrahim | Modellierung und Simulation eines bidirektionalen Gegentaktflusswandlers mit MATLAB/Simulink<br>Betreuer: Prof. Beck, Dr. Turschner, Dipl.-Ing. Schwake   |
| Zhou, Yi                | Modellbildung und Simulation einer geschalteten Reluktanzmaschine<br>Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Bohn  |

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| Gao, Zhongwei               | Modellierung und Simulation der Phasenregelschleife (PLL) mit MATLAB Simulink zur Drehzahlregelung der elektrischen Maschinen<br>Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Bohn  |
| Song, Yinming               | Regelung einer geberlosen Asynchronmaschine<br>Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Bohn  |
| Yacoubi, Mekki              | Modellbildung und Regelung einer Drahtherstelleinrichtung unter besonderer Berücksichtigung der Vibrationsstörungen<br>Betreuer: Prof. Bohn, Dr. Turschner  |
| Boßmeyer, Marcel            | Charakterisierung des Kontaktwiderstandes von Ladungsträgerselektiven Polysiliziumkontakten<br>Betreuer: Dr. Turschner, Dr. Wehrmann  |
| Kammesheidt, Jan Oliver     | Einbindung von Speichern in PV-Systeme zur Begrenzung der Anschlussleistung<br>Betreuer: Dr. Wehrmann, Prof. Wenzl  |
| Baumgärtner, Robert         | Standardisierungskonzept für den Bereich Automatisierung und Steuerungstechnik für dezentral betriebene Wasserkraftanlagen<br>Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Beck   |
| Gollenstede, Julian         | Analyse und Minimierung der Rückwirkungen des Oberwellengehalts eines VISMA-Umrichters im Netzparallelbetrieb auf den DC-Zwischenkreis<br>Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Beck   |
| Rammelt, Christopher Thomas | Wirtschaftlichkeitsanalyse netzintegrierter Batteriespeicher von SLP-Haushalten mit Photovoltaik-Anlage zur Teilnahme am Regelenenergiemarkt im Verbund eines virtuellen Kraftwerkes<br>Betreuer: Prof. Schwindt (WiWi), Dr. Wehrmann |
| Moog, Felix                 | Konzeption und Analyse SOFC- basierter Antriebssysteme am Beispiel eines Abfallsammelfahrzeugs<br>Betreuer: Prof. Faulstich, Dr. Lindermeir (CUTEC-Institut)  |

|                     |   |
|---------------------|---|
| Schütte, Tobias     | Einsatzoptimierung von Kraft-Wärme-Kopplungs-Systemen mit Wärmespeicher und Elektroheizung in verschiedenen Märkten inklusive Regelleistungsvermarktung<br>Betreuer: Dr. Wehrmann, Prof. Beck |
| Zhou, Fei           | Parameterbestimmung für Modelle von Lithium-Ionen-Batterien<br>Betreuer: Prof. Wenzl, Dr. Wehrmann  |
| Schreiber, Winfried | Auslegung von Batteriesystemen zur Lastgangglättung unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit<br>Betreuer: Prof. Wenzl, Dr. Wehrmann  |
| Xiong, Guancheng    | DTC system simulation of induction motor and comparison between DTC system with speed sensor and the system without sensor<br>Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Bohn (IEI)                       |
| Wei, Zheng          | Simulation verschiedener Pulsweitenmodulations-Techniken mit MATLAB/Simulink für Umrichter mit Spannungszwischenkreis<br>Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Bohn (IEI)                            |

## **2017**

|                  |   |
|------------------|---|
| Barhatov, Olga   | Entwicklung eines 4-Quadranten-Kraftwerkes mit dem Ziel der Bereitstellung von Netzdienstleistungen in der zukünftigen Energieversorgung<br>Betreuer: Prof. Wenzl, Dr. Wehrmann |
| Heinz, Christine | Financial and technical modeling of a combined heat and power plant project in Sweden<br>Betreuer: Prof. Schenk-Mathes (WiWi), Prof. Beck                                       |

|                    |  |
|--------------------|--|
| Ivers, Monique     | Analyse von Ausfallursachen und resultierenden Stillstandzeiten verschiedener Windenergieanlagentypen mit anschließender Untersuchung des Optimierungspotentials hinsichtlich Verfügbarkeit und Instandhaltungsstrategie<br>Betreuer: Prof. Beck, Dr. Turschner, Dipl.-Ing. Riedel (get-project) |
| Decker, Christian  | Klimaschutzpotenziale bei Einbindung von Solarenergie in niedersächsische Unternehmen<br>Betreuer: Prof. Beck, Dr. Wehrmann, Dipl.-Ing. Vahlenkamp (Klimaschutz- und Energieagentur Niedersachsen)   |
| Lao, Jiangtao      | Entwurf eines vollständigen Luenberger-Beobachters und eines reduzierten Beobachters für elektrische Antriebe mit schwingungsfähiger Mechanik<br>Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Bohn (IEI)   |
| Choi, Jinhyeong    | Transiente- und frequenzbasierte Schädigungsanalyse einer Abgasanlage unter simulierter Schlechtwegbelastung<br>Betreuer: Prof. Beck, Dr. Turschner, Dipl.-Ing. Schacht (Eberspächer Exhaust Technology), Dr. Riekers (Eberspächer Exhaust Technology)   |
| Kreth, Nils        | Netzanbindung von Schnellladestationen an Autobahnen<br>Betreuer: Prof. Beck, Dr. Wehrmann   |
| Wayi Nkori, Jypsie | Analyse des Energiesystems von Schwimmbädern und ihrer Eignung zur Bereitstellung von Regelenergie<br>Betreuer: Prof. Wenzl, Prof. Zimmermann (WiWi)   |
| Ackmann, Steffen   | Erarbeitung eines technischen und kommerziellen Dimensionierungs- und Optimierungstools für Batteriespeichersysteme<br>Betreuer: Prof. Schwindt (WiWi), Dr. Wehrmann   |

|                              |  |
|------------------------------|--|
| Sturm, Arthur                | Technische und wirtschaftliche Bewertung multivalenter strombasierter Energiesysteme auf Basis numerischer Simulation<br>Betreuer: Prof. Wenzl, Dr. Benger, Dipl.-Ing. Spielmann, Dr. Bieniek (Viessmann Werke), Dipl.-Kfm. Harms-Ensink (Viessmann Werke) |
| Wohlers Soto, Carlos Antonio | Modellierung und Vergleich von vertikaler und horizontaler Turbine für niedrige Nutzfallhöhen und Gezeitenströmungen<br>Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Wenzl   |
| Wu, Xiaolong                 | Simulation von Batteriemanagementsystemen für Lithium-Ionen-Batterien<br>Betreuer: Prof. Wenzl, Dr. Wehrmann   |
| Hoang, Anh Cong              | Simulation verschiedener Regel- und Steuerungskonzepte für HGÜ-Netze im Multiterminalbetrieb mit MATLAB/Simulink<br>Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Wenzl   |
| Brockschmidt, Julia          | District Heating Modelling for Virtual Power Plant Optimization<br>Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Beck   |
| Becker, Lars                 | Modellierung und Regelung einer mehrphasigen E-Maschine<br>Betreuer: Prof. Beck, Dr. Turschner   |
| Bai, Yinghe                  | Modellbildung und Simulation eines Synchronverters nach Zhong<br>Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Wenzl  |
| Wang, Yu                     | Simulation of an electrical sub-transmission grid using Matlab/Simulink<br>Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Bohn (IEI)   |
| Xia, Tian                    | Feldorientierte Regelung der Asynchronmaschine mit und ohne Drehzahlgeber<br>Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Bohn (IEI)   |

|                    |  |
|--------------------|--|
| Zhang, Le          | Droop Control of Inverter in Micro-grid with Matlab/Simulink<br>Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Bohn (IEI)  |
| Zhou, Bijun        | Modellbasierte Implementierung einer direkten Drehmomentregelung von Asynchronmaschinen im Grunddrehzahl- und Feldschwächebereich<br>Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Bohn (IEI) |
| Fries, Ann-Kathrin | Nutzung von PV-Energie für den Eigenbedarf von unterbrechbaren Verbrauchern im Wohnbereich<br>Betreuer: Dr. Wehrmann, Prof. Beck, Dipl.-Ing. Spielmann                         |
| He, Dun            | Parameter Estimation of Friction Model for an Experimental Drill Rig Setup<br>Betreuer: Prof. Bohn, Dr. Turschner  |

## **2 Veröffentlichungen, Dissertationen, Habilitationen**

### **2.1 Zeitschriften- und Tagungsaufsätze, Patente / -anmeldungen**

#### **Zeitschriften- und Tagungsaufsätze, Bücher**

##### **2016**

|               |  |
|---------------|--|
| Ahmels, J.    | e-home Energieprojekt 2020                                       |
| Horn, M.      | Kurzfassung der wissenschaftlichen Projektergebnisse (2011-2016) |
| ...           | Schriftenreihe des EFZN, Band 43, Cuvillier Verlag Göttingen,    |
| Schnieder, R. | ISBN 978-3-7369-9396-9, (2016)                                   |
| Beck, H.-P.   |  |
| ...           |  |

- Beck, H.-P. (Hrsg.)      Potentiale elektrochemischer Speicher in elektrischen Netzen in Konkurrenz zu anderen Technologien und Systemlösungen (ESPEN)  
Schriftenreihe des EFZN, Band 44, Cuvillier Verlag Göttingen, ISBN 978-3-7369-9423-2, (2016)
- Dewenter, T.              Parameter Optimisation Of A Virtual Synchronous Machine In A  
Heins, W.                  Microgrid  
Werther, B.                International Journal of Power and Energy Systems, Vol. 36, No. 4,  
Hartmann, A. K.          (2016)  
Bohn, Ch.  
Beck, H.-P.

## 2017

- Spielmann, V.            Potenziale Elektrochemischer Speicher - Flexibilität im künftigen  
Wenzl, H.                  Stromversorgungssystem  
Beck, H.-P.                ew Magazin für die Energiewirtschaft, Ausgabe 03, S. 56-59,  
...                            (März 2017)  
Koring, K.  
..
- Lin, Guosong            A novel approach to static and dynamic state estimation for three-  
Eichstädt, Sascha        phase electrical distribution grids  
Turschner, Dirk          Proceedings: Smart Grid Inspired Future Technologies - Second  
Beck, H.-P.                EAI International Conference, Smart GIFT 2017, London,  
ISBN 978-3-319-61813-5, Seite 122 - 131, (27. - 28. März 2017)
- Spielmann, V.            Einsatzmöglichkeiten in Netzen und im Regelleistungsmarkt  
Wenzl, H.                  ew Magazin für die Energiewirtschaft, Ausgabe 04, S. 54 - 58,  
Beck, H.-P.                (April 2017)  
...

- Koring, K.  
Maubach, K.-D.  
Beck, H.-P.      Fehlallokationen der Nebenkosten zwischen Tarifgebieten und Kundengruppen  
ew Magazin für die Energiewirtschaft, Ausgabe 07, S. 22-25, (Juli 2017)
- Hüdepohl, D.  
Schild, V.  
Oberland, A.      Abschlussbericht: Regenerative Energien im Mobilfunk, Energieversorgung von Mobilfunkstationen durch Brennstoffzellensystemtechnik, Wind- und Solarenergie  
Technische Informationsbibliothek in Hannover, Seiten IEE 149 - 182, (2017)

**Dissertationen:****2016**

- Chen, Yong      Virtuelle Synchronmaschine (VISMA) zur Erbringung von Systemdienstleistungen in verschiedenen Netzbetriebsarten  
Referenten: Prof. Beck, Prof. Bohn (IEI)
- Stubbe, Markus      Aktive Dämpfung von multifrequenten Torsionsschwingungen in verzweigten Antriebssystemen  
Referenten: Prof. Beck, Prof. Esderts (IMAB)
- Ell, Nikola Sophia      Aktive Dämpfung von Torsionsschwingungen im Antriebsstrang mittels modularer Regelungsverfahren am Beispiel der Windkraft  
Referenten: Prof. Beck, Prof. Esderts (IMAB)

**2017**

- Stebner, Gerhard      Entwicklung eines neuartigen elektrischen Ventiltriebs für Verbrennungsmotoren  
Referenten: Prof. Beck, Prof. Lohrengel (IMW), Prof. Hartwig (Ostfalia, Wolfenbüttel)



|                    |  |
|--------------------|--|
| Küster, Torben     | Zeitdiskrete Modellbildung zur validierten Regelung und Beobachtung von Mischgas-Brennstoffzellensystemen mit Anoden-Abgas-Rückführung<br>Referenten: Prof. Beck, Prof. Turek (ICVT) |
| Schnieder, Raimund | Regelungsverfahren für regelbare Ortsnetztransformatoren im Mono- und Multisensorbetrieb<br>Referenten: Prof. Beck, Prof. Engel (Techn. Universität Braunschweig)                    |

## **2.2 Vorträge / Seminare**

|               |   |
|---------------|---|
| Schnieder, R. | Tutorien in den Grundlagen der Elektrotechnik organisieren und gestalten<br>Lehre gut und rede darüber! Abendveranstaltung des Zentrums für Hochschuldidaktik und Qualitätsmanagement in der Lehre, Clausthal-Zellerfeld, (13. Januar 2016) |
| Turschner, D. | Tanken im Smart Grid - Netzentlastung durch intelligentes Laden<br>Netz-Stadtwerke-Treffen, Veranstalter EWE Netz GmbH, Bruchhausen-Vilsen (20. April 2016)   |
| Turschner, D. | Was ist PiVo - Ein Konzept ohne IKT<br>BSM-Forum auf der MobiliTec 2016, Industriemesse Hannover, (27. April 2016)  |
| Wenzl, H.     | Elektrochemische Speicher für das Stromnetz - Die langfristige Perspektive<br>EW-Tagung Energiespeicher für das Stromverteilnetz, Leipzig (08. November 2017)   |

## **2.3            Geförderte Forschungsvorhaben**

Im Berichtszeitraum wurden folgende geförderte Forschungsvorhaben bearbeitet :

E.ON Avacon AG

e-Home Energieprojekt 2020

Kurzbezeichnung: e-home 2020

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Schnieder

PSI Aktiengesellschaft für Produkte und Systeme der Informationstechnologie

Weiterentwicklung Knotenlastbeobachter

Bearbeiter: Prof. Beck

E-Plus Mobilfunk GmbH & Co. KG

Entwicklung und Realisierung Energieautarker Standorte

Kurzbezeichnung: Energieautarke Sendestationen

Bearbeiter: Prof. Wenzl, Dipl.-Ing. Oberland, Dipl.-Ing. Spielmann

NFF

Graduiertenkollegs Energiespeicher und Elektromobilität Niedersachsen (VWZN2783)

Kurzbezeichnung: GEENI

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Oberland

BMVBS

Schaufenster 1.2: Tanken im Smart Grid

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Schwake

BMVBS

Hochschuloffensive eMobilität für Fort- und Weiterbildung - MOBIL4e

Kurzbezeichnung MOBIL4e

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Tchoupou Lando

MWK

iQ - Intelligente Blindleistungsregelung für Verteilnetze

Kurzbezeichnung: SmartNord Transferprojekt

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Bentaleb

Power Innovations GmbH

Aufbau und Entwicklung einer neuartigen Wechselrichterregelung

Kurzbezeichnung: VISMA-Wechselrichter für Unsymmetrie

Bearbeiter: Dr. Turschner

BMWi über Projektträger Jülich

Wind-Solar-Wärmepumpen-Quartier - Erneuerbar betriebene Wärmepumpen zur Minimierung des Primärenergiebedarfs

Teilvorhaben: Elektrische Verteilnetze für Wärmepumpenquartiere

Kurzbezeichnung: WPuQ

Bearbeiter: Dr. Wehrmann, Dipl.-Ing. Spielmann

DAAD

Fact Finding Mission Marokko

Bearbeiter: Dr. Turschner, Dipl.-Ing. Bentaleb

Nbank / Power Innovation

Entwicklung eines innovativen Umrichtersystems mit Speicher zur Eigenbedarfsoptimierung und Netzstabilisierung

Kurzbezeichnung: Solar VISMA

Bearbeiter: Dr. Turschner

## **2.4 Veranstaltungen, Exkursionen, Gastaufenthalte**

### **Veranstaltungen:**

05. Januar 2016

Dr. Guido Lulf wurde zum Honorarprofessor bestellt



Quelle: Ernst, TU Clausthal

30 Mai 2016

Doktorandenseminar (Vorträge mit anschließender Diskussion)

18. Oktober 2016

Veranstaltung im Haus der Wissenschaft  
(Braunschweig) Energiecafé “Junge Ideen  
für die Welt von Morgen”, wissenschaftliche  
Moderation Dr. Wehrmann



Quelle: L. Häusler, Haus der Wissenschaft Braunschweig GmbH

06. Februar 2017

Doktorandenseminar Teil 1 (Vorträge mit anschließender Diskussion)

20. März 2017

Doktorandenseminar Teil 2 (Vorträge mit anschließender Diskussion)

29. Mai 2017

Doktorandenseminar Teil 3 (Vorträge mit anschließender Diskussion)

29. Juni 2017

EST'ler-Grillen

18. August 2017

Dr. E.-A. Wehrmann wird zum wissenschaftlichen Direktor des Institutes befördert



Quelle: TU Nachrichten

**Exkursionen:**

06. Oktober 2016

Besichtigung der Firma Lenze



Quelle: Fa. Lenze

09. Februar 2017

Besichtigung der Windkraftgeneratoren in Lübeck und Travemünde im Rahmen der Vorlesung “Sonderprobleme elektrischer Maschinen”

- Prototypenfertigung und Generatorreparatur

20. September 2017

Exkursion zum Fraunhofer IWES nach Bremerhaven im Rahmen der Zusammenarbeit mit unserer Partnerhochschule Kyushu Institute of Technology. Neben den Regierungsstipendiaten aus Japan haben auch Mitarbeiter des Instituts an der Exkursion teilgenommen. Vorne links: Prof. Dr.-Ing. Jan Wenske, stellvertretender Institutsleiter des IWES, der an der TU Clausthal promovierte.



**Gastaufenthalte:**

14.09.2016 - 31.10.2016

Herr Noppanat Kongjitugam, Fachpraktikant

31.07.2017 - 25.09.2017

Herr Ahmed Nagy, Fachpraktikant

### **3 Forschungsarbeiten**

#### **3.1 Ausbau der Institutseinrichtungen**

Zur weiteren Komplettierung der Institutseinrichtungen wurden folgende Neuanschaffungen getätigt:

- Tesla- Elektro-Auto, Model S 90D (90 kWh)
- Schnelllade-DC-Tankstelle 50 kW mit Batteriecontainer
- Fassadenintegrierte Photovoltaikanlage 10 kW pp
- Earsy-Windmühle 10 kW pp
- Versuchsanlage zur Kurzunterbrechungskompensation in Niederspannungsnetzen
- Virtuelle Synchronmaschine (Multiterminal-VISMA-Verbund), 15 kVA
- Aktives Verteilnetz Labor mit 2 realen und 2 virtuellen Synchronmaschinen mit Leistungsnachbildungen (Typenleistung ca. 20 kVA)

#### **3.2 Projektblätter**

Die folgende Übersicht und die sich anschließenden neuen bzw. aktualisierten Kurzbeschreibungen der von den wissenschaftlichen Mitarbeitern durchgeführten Forschungstätigkeiten geben Auskunft über den derzeitigen Stand der laufenden Projekte in den drei Arbeitsgruppen:

- Dezentrale Energiesysteme
- Leistungsmechatronik / Antriebe
- Elektrische Energiespeichersysteme

## Projektübersicht

Projektleiter: Dr.-Ing. Ernst-August Wehrmann  
 Tel.: +49-5323-72-2595  
 E-Mail: wehrmann@iee.tu-clausthal.de

### Abteilung Elektrische Energiesysteme

Ein Drittel der Stromerzeugung erfolgte 2017 aus regenerativen Quellen (Bild 1). Allerdings stieg auch der Anteil der Kohleverstromung in den letzten Jahren, was problematisch für die

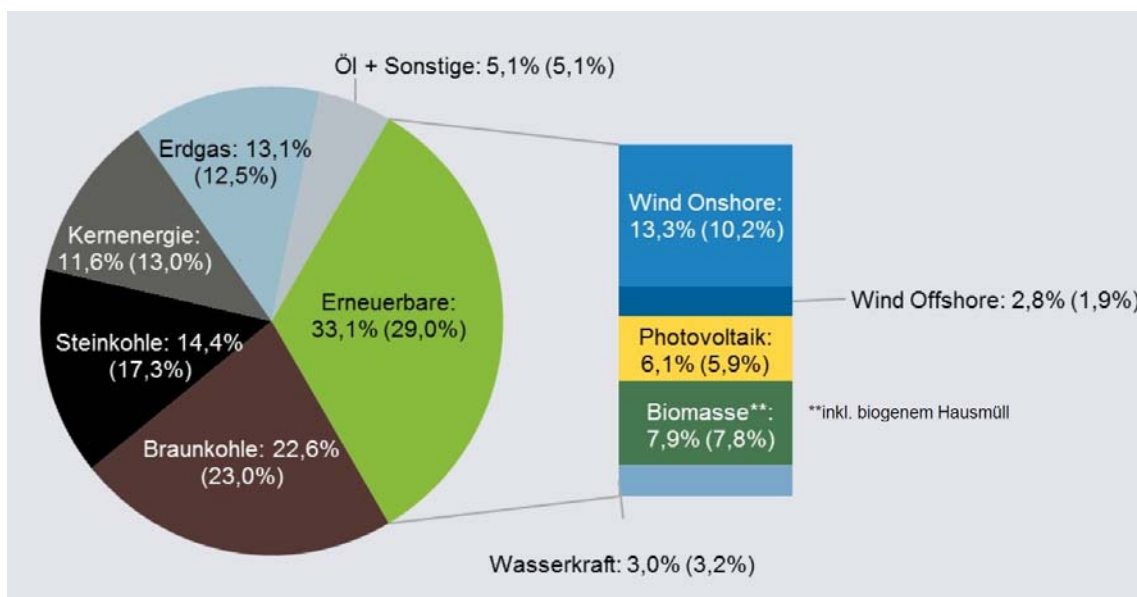


Bild 1: Vorläufige Daten zur Bruttostromerzeugung 2017 (Werte für 2016 in Klammern)

Quelle:

Agora Energiewende "Die Energiewende im Stromsektor: Stand der Dinge 2017", 04.01.2018

gesetzten CO<sub>2</sub>-Ziele der Bundesregierung ist.

Auch auf dem Strommarkt hinterlässt der schon recht hohe Anteil der regenerative Erzeugung seine Spuren. Bei Starkwind oder starker Sonneneinstrahlung mit schwacher Last kommt es immer wieder zu deutlich negativen Börsenpreisen für elektrische Energie (Bild 2).

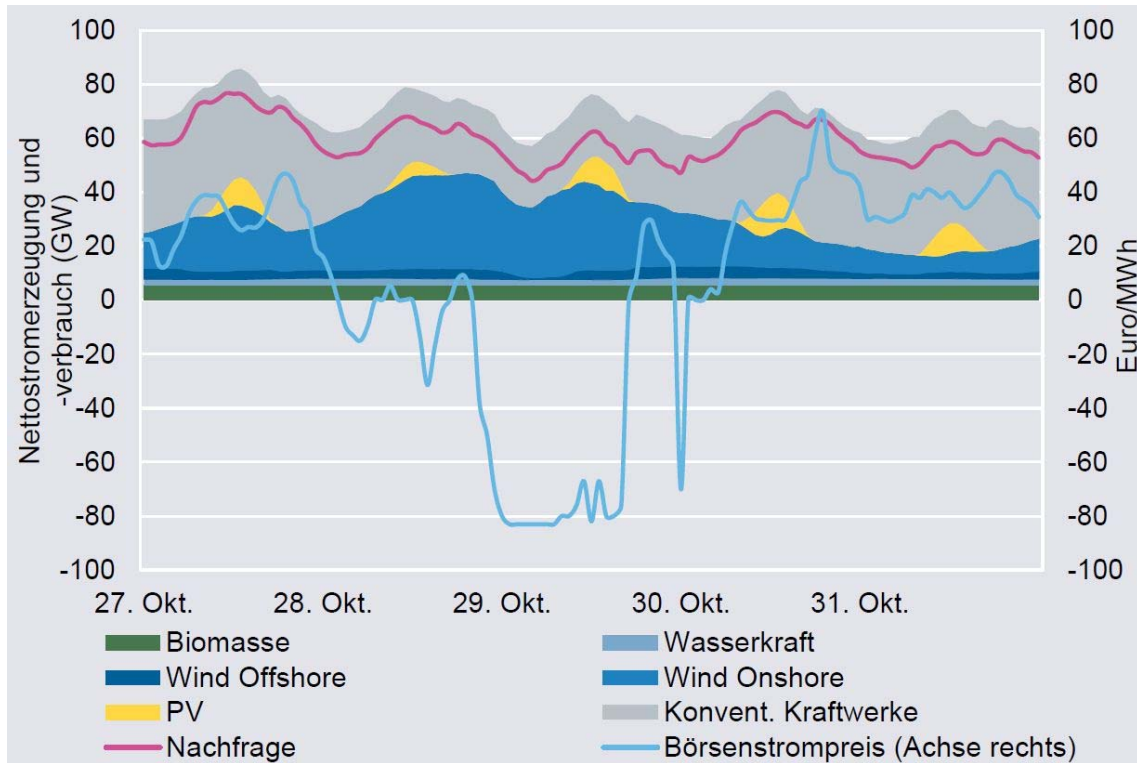


Bild 2: Nettostromerzeugung nach Energieträgern sowie Stromverbrauch und Börsenstrompreis (Day-Ahead) während des Sturmtiefs Herwart im Oktober 2017

Quelle:

Agora Energiewende "Die Energiewende im Stromsektor: Stand der Dinge 2017", 04.01.2018

Die hohe Einspeisung regenerativ erzeugten Stromes stellt weiterhin besondere Anforderungen an die vorhandenen Netze. Im Berichtszeitraum wurde dazu eine hier nicht aufgeführte Studie des EFZN für das niedersächsische Ministerium für Umwelt durchgeführt (die durch das IEE unterstützt wurde). Es wurden die zu erwartende Auslastung der Hoch- und Höchstspannungsnetze in Niedersachsen für verschiedene Szenarien und Zeithorizonte ermittelt. Die Ergebnisse sollen die politische Entscheidung unterstützen, in welchen Regionen welcher Ausbau der regenerativen Erzeugung möglich ist.

In den nachfolgend aufgeführten Forschungsprojekten wird weiterhin die effiziente Integration der regenerativen Quellen in das Versorgungssystem und speziell in das elektrische Verteilnetz behandelt. Fragen zur Systemstabilität und Erbringung von Systemdienstleistungen durch



## Projektübersicht

---

regenerative Erzeuger betreffen wegen der eingesetzten Umrichtersysteme vor allem die Arbeitsgruppe “Leistungsmechatronik” und werden daher zum Teil gemeinsam betreut.

### Aktuelle Projekte:

- **Effiziente Nutzung erneuerbarer Energien durch regionale ressourcenoptimierte intelligente Versorgungs- und Verbrauchsnetze (SMiG)**

Das Projekt wurde inzwischen erfolgreich abgeschlossen. Für vier beispielhafte Gemeinden wurden für verschiedene Szenarien die Potentiale regenerativer Erzeuger zur Versorgung der lokalen Verbrauchern analysiert. Qualifizierende Größen wie Autarkiegrad und Vorort-verbrauchsquote werden in Abhängigkeit von der eingesetzten Speichergröße zur Beurteilung einer Vielzahl von Situationen ermittelt. Die hierbei ermittelten Speichergrößen müssen allerdings als wirtschaftlich angesehen werden.

Bearbeiterin: Dipl.-Ing. Verena Spielmann

- **e-Home Energieprojekt 2020**

Auch dieses Projekt konnte inzwischen erfolgreich abgeschlossen werden. Das Kernthema des IEE-Parts in diesem Projekt war der Einsatz regelbarer Ortsnetztransformatoren (rONT) zur Steigerung der Integrationsfähigkeit von dezentralen Einspeisern und zukünftigen Lasten in das Niederspannungsnetz. Dieses Thema konnte Herr Schnieder sehr erfolgreich für seine Dissertation nutzen und promovierte im Dezember 2017 als inzwischen IEE-Externer zum Dr.-Ing.

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Raimund Schnieder

- **Energieszenarien für den Verkehrssektor in Deutschland bis zum Jahr 2050**

Die Ziele der Energiewende sind bekanntermaßen nicht allein durch die Transformation des Stromerzeugungssystems hin zu regenerativen Quellen zu erreichen. Die Verkehrswende stellt hierzu einen weiteren Baustein bereit. Der derzeit hohe CO<sub>2</sub>-Ausstoß der Mobilität muss deutlich reduziert werden. Dazu sollen Szenarien unter Berücksichtigung verschiedener Dynamiken und möglicher Sektorkopplungen entwickelt werden, die den Einfluss auf die regenerative Erzeugung und die Netze verdeutlichen.

Bearbeiter: Karlo Tkalčec, M.Sc.

- **Netzintegration der zukünftigen Mobilität**

Für die zukünftige Mobilität mit stark reduziertem CO<sub>2</sub>-Ausstoß sind verschiedenen Varianten denkbar. Eine wesentliche ist die Elektromobilität mit regenerativ erzeugtem Strom. Dies wird vor allem bei zukünftig hohen Ladeleistungen (Schnellladung) und bei einer Konzentration von Ladesäulen zu veränderten Laststrukturen im elektrischen (Verteil-)Netz führen. Zur Entlastung der Netze sind stationäre Speicher und intelligente Ladestrategien bis hin zur Rückspeisefähigkeit der Fahrzeugbatterien denkbar. Großen Einfluss wird natürlich auch das zukünftige Mobilitätsverhalten haben. Die unterschiedlichen Einflussfaktoren sollen untersucht und Wege für einen möglichst effizienten Übergang zur nachhaltigen Mobilität herausgearbeitet werden.

Bearbeiter: Nils Kreth, M.Sc.

- **Wind-Solar-Wärmepumpen-Quartier - Erneuerbar betriebene Wärmepumpen zur Minimierung des Primärenergiebedarfs (WPuQ) - Teilvorhaben: Elektrische Verteilnetze für Wärmepumpenquartiere**

“Power to Heat” bietet einerseits eine Möglichkeit, die zukünftige Wärmeversorgung zu dekarbonisieren und andererseits mit Hilfe von Managementsystemen auf die fluktuierende regenerative Erzeugung elektrischer Energie flexibel zu reagieren. In diesem seit August 2017 laufenden Projekt werden dazu zwei sehr unterschiedliche “Wärmepumpen-Quartiere” bezüglich des Wärme- und Stromverbrauchs analysiert. Daraus sollen Schlüsse und Handlungsempfehlungen abgeleitet werden für den koordinierten Wärmepumpenbetrieb zur möglichst hohen Einsparung von (nicht regenerativer) Primärenergie unter Berücksichtigung der Belastung und Spannungshaltung im Niederspannungsnetz.

Bearbeiterin: Dipl.-Ing. Verena Spielmann

- **Zukunftsorientierte Netzentgeltstrukturen**

Die steigende regenerative Stomerzeugung führt zunehmend dazu, dass der Ausbau der elektrischen Netze durch die Erzeugung bestimmt wird. Die Kosten werden jedoch lastorientiert getragen. Das Prinzip der bisher praktizierten Kostenwälzung wird zunehmend

## **Projektübersicht**

---

sowohl bezüglich der regionalen Unterschiede als auch bezüglich der Verursachung als ungerecht erkannt. Mit der “bidirektionalen Kostenwälzung” wurde ein neuer Ansatz zur gerechteren Verteilung der Netzkosten entwickelt und anhand realer Daten erprobt.

Bearbeiterin: Dipl.-Wirtsch.-Ing. Karolina Koring



**Projekt:** Smart Microgrids  
Teilprojekt: Energiesystemtechnik (TP 2)

---

**Problem:** Verbundprojekt: Effiziente Nutzung erneuerbarer Energien durch regionale ressourcenoptimierte, 'intelligente' Versorgungs- und Verbrauchsnetze (Smart Microgrids): Technische und ökonomische Machbarkeit, Umwelt- und Gesellschaftsverträglichkeit  
Teilvorhaben: Energiesystemtechnik (TP 2)



**Ziel:** Verbundprojekt: Die im Projekt verfolgten übergeordneten Ziele betreffen die Erschließung regionaler Potenziale erneuerbarer Energien und deren dezentrale Nutzung durch die dynamische Anpassung von Angebot und Nachfrage. Einhergehend soll die Vulnerabilität des Energiesystems insgesamt reduziert und dessen Flexibilität hinsichtlich des Potenzials der Einbindung erneuerbarer Energiequellen erhöht werden. Unter Einbeziehung verschiedener Praxispartner in zwei Modellregionen wird die soziale Akzeptanz der Nutzung erneuerbarer Energien untersucht.

Im Fokus der im Projekt durchgeführten Betrachtungen steht die Beantwortung der Frage, ob und wie Smart Microgrids dazu beitragen können, intelligente Versorgungsstrukturen zu schaffen, die elektrische Energie aus unterschiedlichen Quellen aufnehmen und die Verbraucher bedarfsgerecht versorgen. Dabei wird insbesondere der zeitliche Ausgleich von Angebot und Nachfrage innerhalb des lokalen Energiesystems untersucht.

#### TP 2 – Energiesystemtechnik:

Ziel dieses Teilprojekts ist die Erarbeitung eines Energiemanagementkonzepts, welches unter Einbeziehung der in den betrachteten Gemeinden vorhandenen Potenziale der Energiebereitstellung aus regenerativen Quellen (Photovoltaik, Wind und Bioenergie) und des Lastmanagements in landwirtschaftlichen und Gewerbebetrieben, eine netzdienliche Austauschleistung mit dem vorlagerten Netz ermöglicht.

**Stand der Technik:** Ziel des Projekts ist die Analyse der technisch-ökonomischen Machbarkeit des lokalen zeitlichen Ausgleichs von Energieangebot und -nachfrage. Aus volkswirtschaftlicher Sicht kann durch diesen Ansatz den steigenden Anforderungen an die Netze durch dezentrale und fluktuierend einspeisende Erzeugungsanlagen begegnet werden [1]. Innerhalb des liberalisierten Strommarktes ist der angestrebte lokale Ausgleich unter Berücksichtigung des freien Wettbewerbs zwischen Energieerzeugung, Energiehandel und den Kunden zu betrachten. Da die wirtschaftlichen Ziele der Marktteilnehmer mit dem Ziel des lokalen Ausgleichs innerhalb des Energiesystems in Konkurrenz stehen können, sind regulatorische Eingriffe erforderlich [2].

---

**Lösungsweg:** Beruhend auf den realen bzw. potentiellen Erzeugungs- und Verbrauchsdaten wurden die Energiesysteme für die im Projekt beteiligten Gemeinden Wolfshagen und Liebenburg (Niedersachsen) und Blankensee (Mecklenburg-Vorpommern) modelliert. Zusätzlich diente die fiktive Modellgemeinde „ADorf“ als Bezugssystem, in dem ein höchstmöglichstes Maß der Flexibilität simuliert wurde.

Die Energiesysteme der Gemeinden setzen sich dabei aus verschiedenen Komponenten zusammen. Auf der Erzeugerseite gehören hierzu zum einen die nicht-steuerbaren und teilweise fluktuierenden Erzeugungsanlagen (z.B. PV-, Windenergie- und Wasserkraftanlagen) und zum anderen steuerbare Erzeuger wie beispielsweise Biomasseanlagen. Verbraucherseitig bieten die Haushalte durch den Einsatz steuerbarer Lasten wie Waschmaschinen oder Kühl- und Gefriergeräte die Möglichkeit lokale Überschüsse direkt zu nutzen bzw. den Verbrauch bei einer Unterdeckung zu reduzieren. Ebenfalls können in Landwirtschaftsbetrieben z.B. Güllepumpen flexibel gesteuert werden. Lastverschiebungspotenziale in Gewerbe- und Industriebetrieben konnten aufgrund nicht verfügbarer bzw. nicht ausreichend wissenschaftlich belegter Daten nicht im Modell angewendet werden. Zusätzlich wurden Speicher (z.B. Batteriespeicher, Biogasspeicher) integriert, um den Vorortverbrauch der regenerativen Energien zu erhöhen.

Entsprechend der Einspeise- und Verbrauchsstruktur konnten somit Energiesysteme im Netzparallel- oder auch Inselnetzbetrieb simuliert werden. Die betrachteten Gemeinden wurden zudem hinsichtlich der nachfolgend beschriebene Szenarien untersucht, die eine Variation der Ausprägung der Erzeuger und der steuerbaren Lasten erlauben.

Szenario 1: keine Lastverschiebung

- a) PV-Einspeiseleistung bis 100%
- b) PV-Einspeiseleistung bis max. 70%

Szenario 2: Lastverschiebung gemäß Haushaltsbefragung (Kühl-/Gefriergeräte: 47%, Waschmaschinen: 42%)

- a) PV-Einspeiseleistung bis 100%
- b) PV-Einspeiseleistung bis max. 70%

Szenario 3: Lastverschiebung aller vorhandenen Geräte

- a) PV-Einspeiseleistung bis 100%
- b) PV-Einspeiseleistung bis max. 70%

**Ergebnisse:** Die Steigerung des lokal genutzten EE-Anteils erfolgt im Wesentlichen durch den Einsatz des Batteriespeichers.

Der Anteil der lokal genutzten EE-Erzeugung kann im Wesentlichen durch den Einsatz eines Batteriespeichers erhöht werden. In Abbildung 1 sind die Vorortverbrauchsquote<sup>1</sup> und der Autarkiegrad<sup>2</sup> für Szenario 1a (unbeeinflusstes Energiesystem/Referenzfall) der Gemeinde Wolfshagen abgebildet. Sowohl die Vorortverbrauchsquote als auch der Autarkiegrad nehmen mit zunehmender Speicherkapazität zu. Ab einer Speichergröße von ca. 5 MWh konvergiert die Vorortverbrauchsquote gegen ca. 50 % bzw. der Autarkiegrad gegen 80 % und der zusätzliche Nutzen einer größeren Speichereinheit ist nur noch minimal. Bis 5 MWh ist folglich eine deutliche Steigerung des lokal genutzten EE-Anteils zu betrachten, diese Speicherkapazität entspricht deutlich weniger als 1 % des EE-Jahresertrags (ca. 8 GWh). Die notwendige Speicherleistung entspricht hingegen ca. 50 % der installierten PV-Leistung. Die Wirtschaftlichkeit wird jedoch auch mit signifikanter Preissenkung der Batteriespeicher-systeme in Frage gestellt.

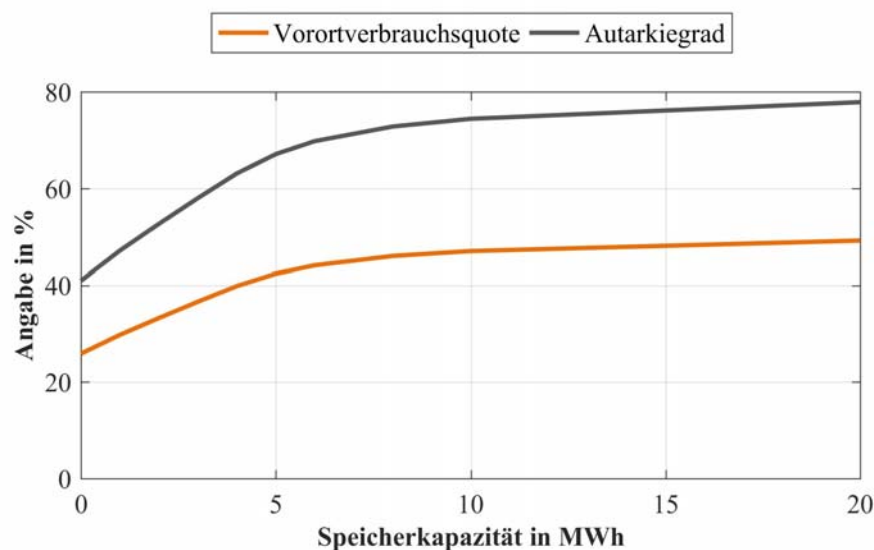


Abbildung 1: Vorortverbrauchsquote und Autarkiegrad (beispielhaft für Wolfshagen)

Die Abweichungen durch zusätzliche Lastverschiebung sind nur sehr gering. Die Steigerung der Vorortverbrauchsquote und des Autarkiegrades durch den Einsatz flexibler steuerbarer Lasten ist im Vergleich lediglich 0,3 bis 0,6 % höher.

<sup>1</sup> Vorortverbrauchsquote: lokale EE-Nutzung bezogen auf die EE-Einspeisung

<sup>2</sup> Autarkiegrad: lokale EE-Nutzung bezogen auf den Gesamtverbrauch

Der Einfluss flexibler Verbraucher auf den lokal genutzten EE-Anteil ist mit ca. 1 % Steigerung sehr gering.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass der Einfluss auf den lokal genutzten EE-Anteil durch den Einsatz flexibler Verbraucher nur sehr gering ist. Die Steigerung des Vorortverbrauchs ist durch Variation des Einsatzes der Komponenten des Energiesystems unterschiedlich hoch. Zu beobachten ist im Vergleich zum Referenzszenario (1a (Vorortverbrauchsquote: 73 %)) eine Steigerung des Vorortverbrauchs durch:

- Batteriespeicher (Szenario 1c) um ca. 10 %
- Lastverschiebung (Szenario 2) um ca. 1 %
- Kombination von Batteriespeicher und steuerbaren Lasten (Szenario 3) um ca. 10 %
- Kombination von Batteriespeicher und steuerbaren Lasten mit Kopplung der steuerbaren Erzeugung um ca. 12 %

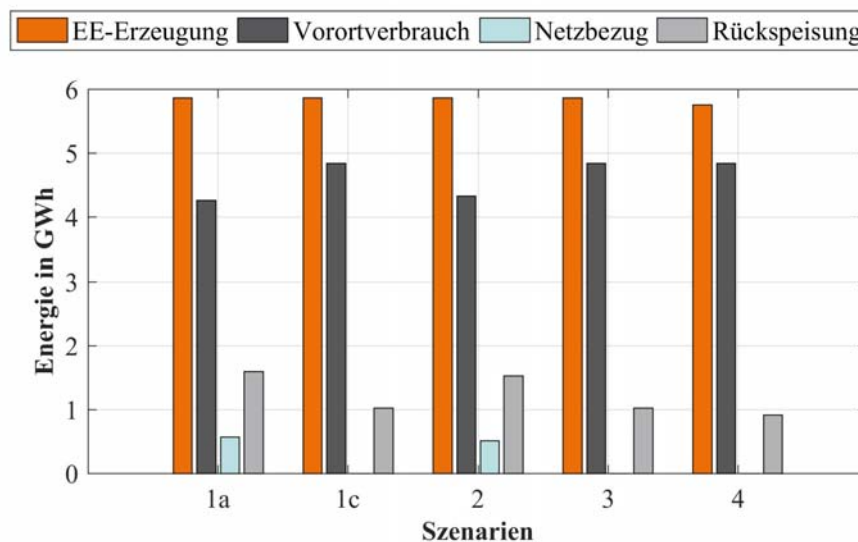


Abbildung 2: Einfluss steuerbarer Verbraucher (beispielhaft für A-Dorf)<sup>3</sup>

Während der Einfluss der flexiblen Lasten folglich lediglich zu einer Erhöhung von 1 % führt, kann die Kombination der steuerbaren Lasten und Erzeuger mit einem Batteriespeicher den Vorortverbrauch um 12 % erhöhen.

<sup>3</sup> Szenario 1a: unbeeinflusstes Energiesystem, Szenario 1c: unbeeinflusstes Energiesystem mit Batteriespeicher (300 MWh), Szenario 2: mit Lastverschiebung und ohne Batteriespeicher, Szenario 3: mit Lastverschiebung und Batteriespeicher (300 MWh), Szenario 4: mit Lastverschiebung und Batteriespeicher (300 MWh) und steuerbare Erzeuger



Die Rückspeiseleistung kann durch Abregelung von PV-Anlagen auf 70 % der Einspeiseleistung um 12 % verringert werden.

Die Abregelung der PV-Anlagen auf 70 % der maximalen Einspeiseleistung führt zu einer deutlichen Verringerung der Rückspeiseleistung. Die Verringerung des PV-Ertrags durch die Begrenzung der Einspeiseleistung auf 70 % beläuft sich dabei nur auf ca. 1 in den betrachteten Gemeinden. Die Rückspeiseleistung kann durch die Reduktion der PV-Leistung jedoch um 10 – 12 % (in der Gemeinde Wolfshagen) verringert werden.

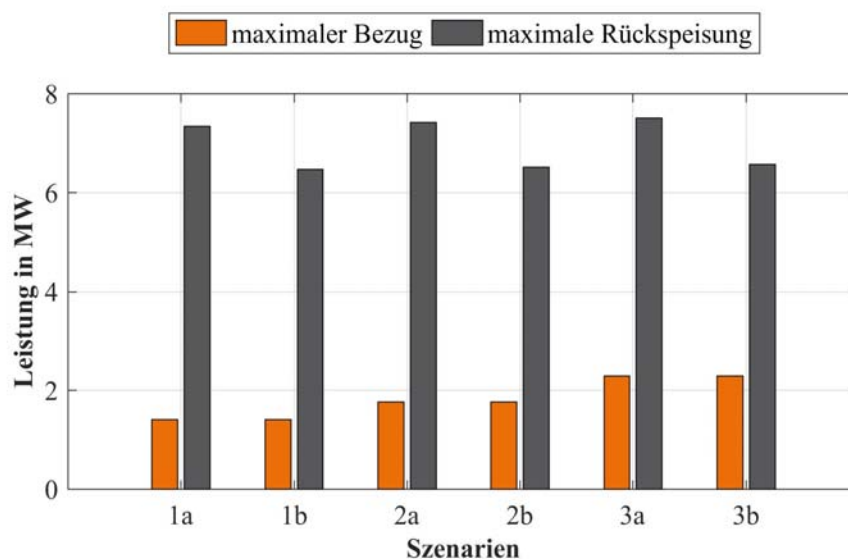


Abbildung 3: Ergebnisse der maximalen Bezugs- und Rückspeiseleistung für die Gemeinde Wolfshagen

**Projektstand:** Innerhalb des Berichtszeitraums wurde das Projekt abgeschlossen und die erhaltenen Ergebnisse mit den beteiligten Modellgemeinden diskutiert.

Teilergebnisse des Projekts wurden im Rahmen verschiedener Konferenzen veröffentlicht [3] - [8].

**Publikationen:** [1] Energietechnische Gesellschaft im VDE (Hrsg.): VDE-Studie Dezentrale Energieversorgung 2020. Frankfurt am Main, 2007

- 
- [2] Aichele, C.; Doleski, O.: Idee des intelligenten Energiemarktes. In: Smart Market: Vom Smart Grid zum intelligenten Energiemarkt. Wiesbaden: Springer Verlag, 2014
  - [3] Bettinger, C.; Holstenkamp, L.: A systematic survey of business models for smart micro-grids under current legal and inventive conditions, ETG-Kongress 2015, 16. und 7. November 2015 in Bonn (Veröffentlichung angenommen)
  - [4] Skau K., Bettinger C., Schild V., Fuchs C. & Beck H.-P. 2015: Betriebsstrategien für Biogas-anlagen zwischen netzdienlichem und wirtschaftlich orientiertem Betrieb. 9. Rostocker Bioenergieforum. Rostock, Band 52, S.277-289, 18. und 19. Juni 2015
  - [5] Skau, K., Fuchs, C., Bettinger, C., Spielmann, V., Beck, H-P. 2015: Renewable Energy – Opportunities for production and use of electrical power for farmers under conditions of the renewable energy act in Germany, Proceedings of the 19th International Farm Management Association Congress, Quebec, Kanada, Peer Reviewed Papers in Proceedings Volume I, p. 429-435, 12 – 18 Juli 2015.
  - [6] Spielmann, V., Bettinger, C., Skau, K., Beck, H.-P., Fuchs, C.: Auswirkungen der Anreizsysteme für private PV-Anlagenbetreiber auf das lokale Verteilnetz. In: Schulz, Detlef (Hrsg.): Tagungsband Nachhaltige Energieversorgung und Integration von Speichern; NEIS 2015, 1. Aufl. 2015, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2015, S. 27-33
  - [7] Skau, K., Bettinger, C., Spielmann, V., Fuchs, C., Beck, H-P. 2015: Speicherung von PV-Energie und Nutzung in der Milchproduktion - Netzdienlichkeit und Wirtschaftlichkeit, Posterbeitrag zur GeWiSoLa-Tagung 2015, Gießen
  - [8] Spielmann, V., Bettinger, C., Skau, K., Beck, H.-P., Fuchs, C.: A highly transparent method of assessing the contribution of incentives applied to technical challenges in decentralised energy systems. In: Power Engineering Society in the VDE (ETG) (Hrsg.): International ETG Congress 2015: Die Energiewende; blueprints for the new energy age; proceedings; November 17 - 18, 2015, World Conference Center, Bonn. Berlin [u.a.]: VDE Verlag, 2015 (ETG-Fachberichte, 147, CD-ROM)
-

**Projekt:** Smart Microgrids  
Teilprojekt: Energiesystemtechnik (TP 2)

---

**Projektpartner:**

- Ecolog Institut für sozial-ökologische Forschung und Bildung (Projektkoordination)
- Energie-Forschungszentrum Niedersachsen (ausführende Stelle: Institut für elektrische Energietechnik und Energiesysteme, TU Clausthal)
- Hochschule Neubrandenburg
- Leuphana Universität Lüneburg

**Praxispartner:**

- Stadtwerke Neustrelitz
- Landeszentrum für erneuerbare Energien Mecklenburg-Vorpommern
- Energie Ressourcen Agentur Goslar
- Volkswind Immenrode

**Projektlaufzeit:** 01.06.2013 - 31.05.2016

**Gefördert durch:** Bundesministerium für Bildung und Forschung

**Projektkoordination:** Dr. H.-Peter Neitzke (ecolog Institut)

**Berichtszeitraum:** 01.10.2015 - 31.05.2016

**Bearbeiter:**

Dipl.-Ing. Verena Spielmann (Tel.: 72-3736)  
verena.spielmann@tu-clausthal.de

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Karolina Koring (05321/3816-8101)  
karolina.koring@tu-clausthal.de

**Projektleiter** Prof. Dr.-Ing. H.-P. Beck (Tel: 72-2570)  
**(Teilprojekt 2):** info@iee.tu-clausthal.de

---



**Problem:** Die elektrischen Energieversorgungsnetze sind traditionell darauf ausgelegt, die von den zentralen Großkraftwerken generierte elektrische Energie zu den Endkunden zu transportieren. Monetäre Anreize durch das Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) förderten in den vergangenen Jahren den Ausbau der Energiewandlung aus Sonne und Wind. Daher kommt es auch im Bereich des Niederspannungsnetzes zu vermehrt dezentralen Einspeisungen. Doch zusätzlich werden neue Lasten, wie zum Beispiel Klimageräte oder Elektroautos, im Niederspannungsnetz integriert. Diese Belastungsveränderungen können eine Verletzung des zulässigen Spannungstoleranzbandes hervorrufen und fordern daher eine Optimierung oder einen Ausbau dieser Netzebene. Nach Norm (DIN EN 50 160) wird zwischen Mittelspannungsumspannwerk und Hausanschluss eine Toleranz von  $\pm 10 \% U_n$  (Nennspannung) gewährt. Dieses kann netzplanerisch vom Verteilnetzbetreiber (VNB) beliebig auf die Mittel- und Niederspannungsebene aufgeteilt werden. Um Spannungsbandverletzungen zu vermeiden, haben Verteilnetzbetreiber verschiedene Möglichkeiten. Einerseits kann durch Netzverstärkungsmaßnahmen, wie das Verlegen größerer Kabelquerschnitte oder der Austausch von Transformatoren durch Leistungsstärkere, die Kurzschlussleistung des Netzes erhöht und folglich die Netzurückwirkungen in Form von kritischen Spannungsänderungen reduziert werden. Eine weitere Möglichkeit ist die Netzintegration eines regelbaren Transformators in die Ortsnetzstationen, der über einen Laststufenschalter die sekundärseitige Spannung (Niederspannung) unterbrechungsfrei einstellen kann und für die Einhaltung des zulässigen Spannungstoleranzbandes sorgt.

Für die Untersuchungen in zwei Ortsnetzen förderte die Avacon AG in den Gemeinden Weyhe und Stuhr insgesamt 30 Haushalte bei der Anschaffung von Photovoltaikanlagen, Klimageräten und dem Leasing von Elektrofahrzeugen. Auch entsprechende Investitionen in die Netzinfrastruktur (Messtechnik, Smart-Meter etc.) wurden getätigt, sowie die Ortsnetzstationen mit regelbaren Transformatoren (rONT) ausgestattet.

Das Projekt ist im Jahr 2013 um drei Jahre verlängert worden und in diesem Rahmen wurden auch PV-Hausspeichersysteme als neue Technologie mit aufgenommen die unter anderem unter dem Gesichtspunkt einer möglichen netzdienlichen Wirkung untersucht worden sind.

**Ziel:** Das Forschungsvorhaben zielte darauf ab, Planungsgrundsätze für die zukünftigen Anforderungen der Niederspannungsnetze zu erarbeiten und die neue Netzaufgabe zu identifizieren. Für die notwendigen Untersuchungen stellte die Avacon AG zwei reale Versuchsnetze zur Verfügung.

Das Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme beschäftigte sich im Rahmen des e-home Energieprojektes in erster Linie mit der Auslegung und Netzintegration eines regelbaren Ortsnetztransformators zur Spannungsregelung im Niederspannungsverteilnetz. In Kooperation mit den Projektpartnern wurden die notwendigen technischen Daten eines regelbaren Ortsnetztransformators mit zugehörigem Laststufenschalter ermittelt. Ebenfalls wurden

---

---

ein geeigneter Regelalgorithmus für den Mono- und den Multisensorbetrieb und die entsprechende Reglerparametrierung herausgearbeitet, um zukünftig durch den Einsatz von regelbaren Ortsnetztransformatoren die Einhaltung der Spannungstoleranzen zu gewährleisten und die Anschlusskapazität an das bestehende Niederspannungsnetz ohne weitere Netzausbaumaßnahmen zu erhöhen.

**Stand der Technik:** Regelbare Ortsnetztransformatoren sind mittlerweile als Standardbetriebsmittel am Markt verfügbar und werden in der Praxis verwendet. Im Projekt wurden die regelbaren Ortsnetztransformatoren der Maschinenfabrik Reinhausen eingesetzt, die eine Stufenbreite von 2,5 % der Nennspannung ( $U_n$ ) und neun Stufen besitzen und folglich einen gesamten Regelbereich von 20 % der Nennspannung abdecken. Überwiegend werden die regelbaren Ortsnetztransformatoren im Monosensorbetrieb betrieben. Der Istwert des Reglers wird dabei direkt an der Niederspannungs-Sammelschiene (Unterspannungsseite) des Transformators erfasst. Der gemessene Spannungseffektivwert wird durch den Regler im definierten Reglertotband (z.B.  $\pm 2 \% U_n$ ) gehalten. Hierdurch ergeben sich zusätzliche netzplanerische Freiheiten für das Niederspannungsnetz in Bezug auf den Spannungshub bzw. –fall.

**Lösungsweg:** Durch den Einsatz regelbarer Transformatoren in den Ortsnetzstationen können die Spannungsfluktuationen durch dezentrale Erzeugereinheiten, wie auch durch zusätzliche Lasten, geregelt werden. Folglich wird die Anschlusskapazität von dezentralen Erzeugereinheiten und zusätzlichen Lasten ohne weitere konventionelle Netzausbaumaßnahmen erhöht. Beim Monosensorbetrieb wird die Mittelspannungsfluktuation geregelt, sodass das Niederspannungsnetz netzplanerisch vom Mittelspannungsnetz hinsichtlich des Spannungstoleranzbandes nach DIN EN 50 160 von  $\pm 10 \% U_n$  entkoppelt ist und dieses abzüglich des Reglertotbandes voll im Niederspannungsnetz zur Verfügung steht.

Beim Multisensorbetrieb können zusätzliche im Netz eingesetzte Spannungsmessstellen berücksichtigt werden, um auch diese Knoten in das zulässige Spannungstoleranzband durch geeignete Stufen des rONT zu regeln.

**Projektstand:** Das e-home Energieprojekt lief seit 2011 über fünf Jahre und wurde am 30.06.2016 abgeschlossen. Die Untersuchungen während der Projektlaufzeit wurden entsprechend der Erkenntnisse dynamisch an die aktuellen Gegebenheiten angepasst.

In den ersten beiden Projektjahren wurde die notwendige Konfiguration des regelbaren Ortsnetztransformators (rONT) ermittelt. Hierbei ergab sich nach Auswertung von Spannungsmesswerten aus Mittel- und Niederspannungsnetzen, sowie der Fortführung der Überlegung zur Abhängigkeit der Stufenbreite, der Stufenanzahl und der sich ergebenden Freiheiten für den netzplanerischen Spannungshub aus der Orientierungsstudie [1] ein notwendiger Gesamtregelbereich von 21,5 %  $U_n$  bei elf Stufen und einer Stufenbreite von 2,15 %  $U_n$ . Die in der Praxis

---

eingesetzte Variante des regelbaren Ortsnetztransformators (Maschinenfabrik Reinhausen) besitzt einen Gesamtregelbereich von 20 %  $U_n$  bei neun Stufen mit einer Stufenbreite von 2,5 %  $U_n$  und liegt damit in der gleichen Größenordnung wie aus den wissenschaftlichen Untersuchungen hervorging.

Des Weiteren wurden verschiedene Regelalgorithmen des Monosensorbetriebes in der Netzrechnungssoftware DIGSILENT Power Factory implementiert und hinsichtlich Flickerstärke, Stufhäufigkeit und Spannungsextrema an den Netzknoten miteinander verglichen. Außerdem sind die Wechselwirkungen mit der Q(U)-Regelung von Wechselrichtern untersucht worden, wobei sich keine negativen Rückkopplungen ergaben, sondern der rONT hinsichtlich des Stufverhaltens geringfügig entlastet wurde. [2]

Im dritten Projektjahr wurde die Thematik Multisensorbetrieb mit dem Ziel einen geeigneten Regelalgorithmus zu entwickeln und zu erproben untersucht. Ebenfalls war der durch diese Betriebsart vermiedene konventionellen Netzausbau anhand von Beispielnetzstrukturen zu ermitteln. In den Niederspannungsnetzstrukturen des Projektpartners stellte sich diese Betriebsart als Einzelfallentscheidung heraus, da bei den durchschnittlichen Leitungslängen und gleichmäßiger Erhöhung der Durchdringung dezentraler Einspeisung nach einem rONT Einsatz im Monosensorbetrieb eine Leitungsverstärkung aufgrund der thermischen Belastungsgrenzen (Stromtragfähigkeit) durchgeführt werden musste. Der Multisensorbetrieb kann daher bei Niederspannungsnetzstrukturen mit langen Ausläuferleitungen und zeitlich unterschiedlicher Belastung (Last/Erzeugung) eingesetzt werden. [3], [4]

Aufgrund der Erkenntnisse aus dem dritten Projektjahr wurden im vierten Projektjahr weitere alternative Regelungskonzepte untersucht. Hierzu zählt unter anderem der Monosensorbetrieb mit variabler Sollwertvorgabe in Abhängigkeit der gemessenen Solarstrahlung, da die dezentrale Einspeiseleistung durch PV-Anlagen und der damit verbundene Spannungshub im Netz mit der Solarstrahlung korreliert und im Vergleich zum Multisensorbetrieb mit wenig Zusatzaufwand das bestehende Netz hinsichtlich der Spannungstoleranzen besser ausgenutzt werden kann. Außerdem ergibt sich die Möglichkeit, die Spannung in lastgeprägten Zeiten an der Ortsnetzstation hochzusetzen, um somit bei überwiegend nichtlinearen Lasten die Netzverluste zu reduzieren. [5]

Das fünfte Projektjahr beinhaltet aus diesem Grund die Untersuchung der zusätzlichen Verluste regelbarer Ortsnetztransformatoren und der Netzverluste in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Elektrische Energiesysteme (IfES) der Leibniz-Universität Hannover. Das Ziel war, einen Vergleich der Verluste zu ermöglichen, um zukünftig durch eine geeignete Regelung des rONT die gesamten Verluste des Gesamtsystems (rONT und Niederspannungsnetz) zu reduzieren. Aus diesen Untersuchungen ging hervor, dass die rechnerisch ermittelten Verluste maßgeblich von der rONT-Modellierung abhängig sind und aufgrund nicht messtechnisch identifi-

---

zierter Parameter nur eine Abschätzung zur Verlustentwicklung durchgeführt werden konnte (s. [6]).

In der letzten Projektphase, wie auch in den eigenen wissenschaftlichen Untersuchungen, wurde die der rONT-Regelung weiterentwickelt. Durch einen „Beobachter“, der den Spannungszustand im Niederspannungsverteilnetz annähert und damit einen zur Netzsituation passenden Spannungssollwert ermittelt, kann der Monosensorbetrieb erweitert werden, um die Spreizung der Netzspannung an den Knotenpunkten zu reduzieren. Hierdurch kann die Aufnahmekapazität des Netzes erhöht werden.

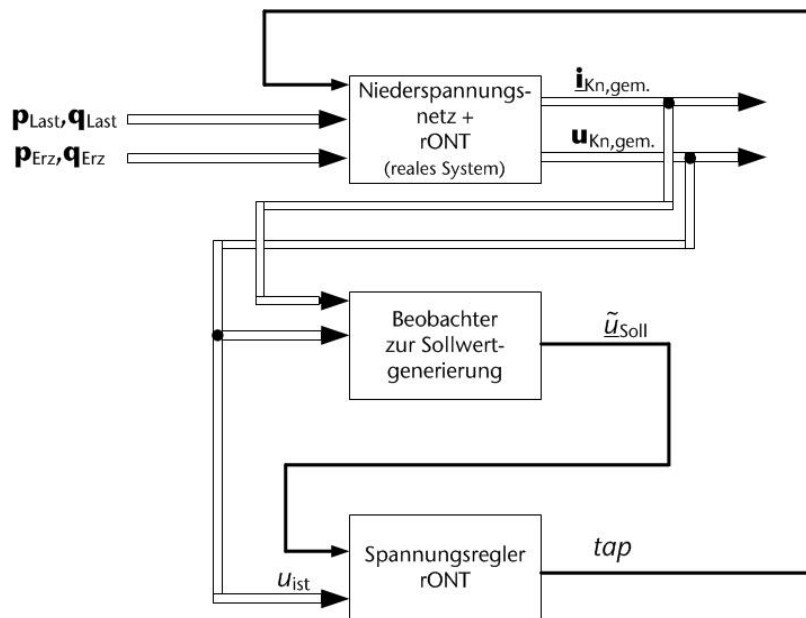


Abbildung 1: Prinzip des rONT-Reglers im Monosensorbetrieb mit dynamischer Spannungssollwertgenerierung durch einen Beobachter

Die Ergebnisse der Untersuchungen zu den unterschiedlichen Regelungskonzepten und dem Nutzen hinsichtlich des Einsatzes regelbarer Ortsnetztransformatoren im Niederspannungsverteilnetz zur Spannungshaltung sind in der Dissertation des Projektbearbeiters enthalten.

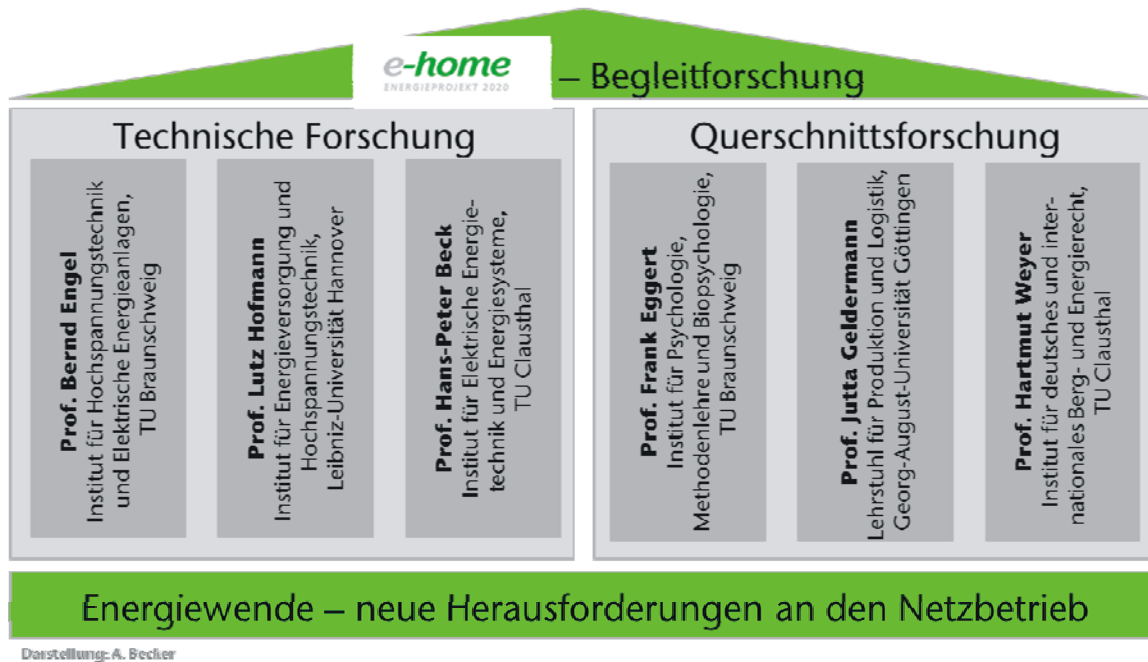
Die wissenschaftlichen Kernergebnisse des e-home Energieprojektes sind zusammenfassend in der EFZN-Schriftenreihe (Band 43) [6] niedergeschrieben.



- Publikationen:**
- [1] Werther, B.; Becker, A.; Wehrmann, E.-A.; zum Hingst, J.; Beck, H.-P.; Orientierungsstudie regelbare Ortsnetztransformatoren; Band 6 der EFZN Schriftenreihe, Cuvillier-Verlag Göttingen
  - [2] Schnieder, R.; Wehrmann, E.-A.; Beck, H.-P.; Untersuchung verschiedener Regelungskonzepte für regelbare Ortsnetztransformatoren zur Spannungshaltung in Niederspannungsverteilnetzen; Konferenz für Nachhaltige Energieversorgung und Integration von Speichern (NEIS), Hamburg, (12.-13. September 2013)
  - [3] Becker, A.; Lühn, T.; Mohrmann, M.; Schlömer, G.; Schmidtman, G.; Schneider, D.; Schnieder, R. unter Beteiligung von Hofmann, L.; Beck, H.-P.; Geldermann, J.; Weyer, H.;  
Netzausbauvarianten in Niederspannungsverteilnetzen – Regelbare Ortsnetztransformatoren in Konkurrenz zu konventionellen Netzausbaumaßnahmen; Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrum Niedersachsen, Cuvillier Verlag Göttingen, ISBN 978-3-95404-757-4, 2014
  - [4] Schnieder, R.; Wehrmann, E.-A.; Beck, H.-P.; Spannungsregelung in Niederspannungsverteilnetzen durch regelbare Ortsnetztransformatoren im Mono- und Multisensorbetrieb  
Konferenz für Nachhaltige Energieversorgung und Integration von Speichern (NEIS), Hamburg, (18.-19. September 2014)
  - [5] Schnieder, R.; Wehrmann, E.-A.; Beck, H.-P.; Einsatzmöglichkeiten regelbarer Ortsnetztransformatoren zur Spannungshaltung und Netzverlustreduzierung in Niederspannungsverteilnetzen  
Konferenz für Nachhaltige Energieversorgung und Integration von Speichern (NEIS), Hamburg, (10.-11. September 2015)
  - [6] Ahmels, J.; Horn, M.; Lietz, F.; Loges, H.; Lühn, T.; Schlömer, G.; Schnieder, R.; Beck, H.-P.; Engel, B.; Eggert, F.; Weyer, H.; Hofmann, L.; Geldermann, e-home Energieprojekt 2020 – Kurzfassung der wissenschaftlichen Projektergebnisse (2011-2016)  
Band 43 der Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen, Cuvillier Verlag Göttingen, ISBN 978-3-7369-9396-9, 2016
-

**Projektpartner am EFZN:**

**Transdisziplinärer Forschungsansatz des Energieforschungszentrum Niedersachsen (EFZN):**



in freundlicher Zusammenarbeit mit der Avacon AG, Helmstedt.

**Projekthomepage:** [www.ehomeprojekt.de](http://www.ehomeprojekt.de)

**Projektlaufzeit:** 01.11.2010 - 30.06.2016

**Gefördert durch:**



**Bearbeiter:** Dipl.-Ing. Raimund Schnieder

**Projektleiter:** Dr.-Ing. E.-A. Wehrmann (Tel: 72-2595)  
wehrmann@iee.tu-clausthal.de

**Projekt:** Energieszenarien für den Verkehrssektor in Deutschland bis zum Jahr 2050

**Problem:** Durch das Wachstum der Erdbevölkerung und die fast täglichen technischen Fortschritte wird die Globalisierung vorangetrieben. Dies hat wiederum, neben anderen positiven und negativen Auswirkungen, einen erhöhten Bedarf an Energie und Mobilität zur Folge. Die daraus entstehende erhöhte CO<sub>2</sub> Emissionen beschleunigen den Klimawandel auf der Erde. Um die möglichen schlechten Auswirkungen des Klimawandels auf die Erdbevölkerung zu vermeiden, haben die 195 Mitgliedsstaaten der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen eine Begrenzung der menschengemachten globalen Erwärmung auf deutlich unter 2 °C gegenüber vorindustriellen Werten vereinbart [1].

Ein Übergang von der nicht nachhaltigen Nutzung von fossilen Energieträgern zu einer nachhaltigen und klimafreundlichen Energieversorgung mittels erneuerbarer Energien ist die Lösung des Klima-Problems und wird mit dem Begriff „Energiewende“ bezeichnet. Ziel der Energiewende in Deutschland ist es, bis 2050 den Anteil der erneuerbaren Energien am Stromverbrauch auf 80 % zu steigern, den Primärenergieverbrauch im selben Zeitraum verglichen mit dem Jahr 2008 um 50 % zu senken und den Treibhausgasausstoß in Einklang mit den EU-Zielen um 80 bis 95 % verglichen mit dem Jahr 1990 zu reduzieren [2].

Jedoch ist in den letzten Jahren der Energiewende klargeworden, dass die nationalen und internationalen Klimaschutzziele nur mit einer Energiewende im Stromsektor nicht erreicht werden können. Vielmehr ist eine sektorübergreifende Energiewende notwendig. Der Verkehrssektor liefert nach der Energiewirtschaft den größten Beitrag zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen [3]. Aus diesem Grund hat Deutschland beschlossen, den Verkehr zu dekarbonisieren. Um dies zu erreichen werden mehrere Maßnahmen notwendig, unter anderen die Erhöhung der Anzahl von Elektro- und Hybridfahrzeugen, Ausbau der entsprechenden Ladeinfrastruktur für die direkte Strombereitstellung und synthetischen Kraftstoffe, usw. Nötig werden auch die Maßnahmen, die das Mobilitätsverhalten beeinflussen (siehe Abbildung 1). All dies wird einen großen Einfluss auf den Energiebedarf des Verkehrssektors haben.



Abbildung 1: Geometrie der Verkehrswende (Quelle: Agora Verkehrswende)

---

**Ziel:** Ziel des Projektes ist die Erstellung unterschiedlicher dynamischer Energieszenarien für den deutschen Verkehrssektor unter Berücksichtigung der Sektorenkopplung. Diese Szenarien sollen die Entwicklung des Energieverbrauchs bis zum Jahr 2050 darstellen. Dadurch wird es möglich sein, den erforderlichen Ausbau von erneuerbaren Energien und des Netzes besser abzuschätzen.

**Lösungsweg:** Da letztendlich das Mobilitätsverhalten den Energiebedarf bestimmt, wird es die Grundlage aller Szenarien in diesem Projekt sein. Dazu werden anhand verschiedener Studien mehrere Kategorien gebildet, die das Mobilitätsverhalten der Menschen abbilden. Darüber hinaus werden auch die Einflussfaktoren berücksichtigt die in späteren Zeitpunkten in Kraft treten. Somit wird die gewünschte Dynamik der Szenarien erzielt.

Anhand des Benutzerverhaltens wird der gesamte Energieverbrauch, bestehend aus dem direkten Stromverbrauch und dem Verbrauch von den aus den Power2X-Anlagen erzeugten synthetischen Kraftstoffen, ermittelt.

- Literatur** : [1] United Nations Framework Convention on Climate Change: Adoption of the Paris agreement. Paris, 2015.  
<http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf> [Zugriff am 05.12.2017]
- [2] Hans-Martin Henning, Andreas Palzer: A comprehensive model for the German electricity and heat sector in a future energy system with a dominant contribution from renewable energy technologies—Part I: Methodology. Renewable and Sustainable Energy Reviews 30, 2014, 1003–1018, Seite 1004
- [3] Umweltbundesamt: Emissionsquellen  
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgasemissionen/emissionsquellen#textpart-1> [Zugriff am 05.12.2017]

**Bearbeiter:** Karlo Tkalčec, M. Sc. (Tel: 05321/3816-8101)  
karlo.tkalcec@tu-clausthal.de

**Projektleiter:** Prof. Dr.-Ing. M. Faulstich

**Projekt:** Netzanbindung von Schnellladestationen

---

**Projekt:** Mit dem 2015 beschlossenen Klimaabkommen von Paris bekennt sich die Weltgemeinschaft zum gemeinsamen verbindlichen Ziel, die Erderwärmung auf 1,5°C gegenüber vorindustrieller Werte zu begrenzen. Die dafür notwendigen nationalen Klimaschutzziele fasste die Bundesregierung im „Klimaschutzplan 2050“ zusammen. Zur Erreichung des Langfristziels der Treibhausgasneutralität bis Mitte des Jahrhunderts sind in diesem Plan Zwischenziele sowie strategische Maßnahmen festgehalten. Insgesamt sollen bis 2050 die Treibhausgasemissionen um rund 95 % im Vergleich zu 1990 gesenkt werden. Der Verkehr emittiert etwa 18 % der gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen Deutschlands, wovon wiederum 96 % auf den Straßenverkehr zurückzuführen sind. Im Klimaschutzplan 2050 sieht die Bundesregierung eine Reduktion dieser Emissionen um 40 % bis 2030 und einen weitgehend treibhausgasemissionsfreien Verkehr bis 2050 vor. [1] Diese Dekarbonisierung des Verkehrs erfordert die Substitution fossiler Kraftstoffe durch regenerativ hergestellte Energieträger. Da der Einsatz biogener Kraftstoffe aufgrund des hohen Platzbedarfs beschränkt ist und nicht den gesamten Energiebedarf des Verkehrssektors abdecken kann, bestehen nur drei Möglichkeiten der Substitution: [2]

- Herstellung von flüssigen Kraftstoffen auf Basis von regenerativ erzeugtem Strom zur Nutzung in Motoren (Power-to-Liquid)
- Herstellung von gasförmigen Kraftstoffen auf Basis von regenerativ erzeugtem Strom zur Nutzung in Brennstoffzellen (Power-to-Gas)
- direkte Nutzung des regenerativen Stroms in Elektrofahrzeugen (Power-to-Mobility)

Derzeit steht die Elektromobilität im Vordergrund: Einerseits wird von der Automobilindustrie die Entwicklung von batterieelektrischen Fahrzeugen vorangetrieben, andererseits kann seit 2016 beim Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle der sogenannte Umweltbonus für Elektro- und Hybridfahrzeuge beantragt werden. Doch allen Bemühungen zum Trotz steigt die Zahl der Elektrofahrzeuge in Deutschland nur langsam an. Zu den größten Hemmnissen zählen derzeit unter anderem die geringe Reichweite, die lange Ladedauer und die schlecht ausgebaute Ladeinfrastruktur. [3]

**Ziel:** Damit der Nutzer nur seinen Antrieb und nicht sein Mobilitätsverhalten wechseln muss, sollte ein flächendeckendes Netz an Schnellladestationen an Hauptverkehrsachsen errichtet werden. Deren Auswirkungen auf das Netz und die Umsetzung vor Ort sollen näher untersucht werden. Dabei stehen Alternativen zum Netzausbau, wie die Nutzung eines Batteriespeichers, der die Leistungsspitzen ausgleicht, im Vordergrund. Auch sollen Möglichkeiten, die Fahrzeuge rein regenerativ zu laden, betrachtet werden. Die Untersuchungen erfolgen zum einen aus der Sicht des Netzbetreibers und zum anderen aus der Sicht des Betreibers der Ladestation.

---

**Stand der Technik:** Die Ökobilanz batterieelektrischer Fahrzeuge weist im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen große Potentiale für mögliche CO<sub>2</sub>-Einsparungen auf. So können die Lebenszyklusemissionen des Fahrzeuges durch die verlängerte Nutzung der Batterie im Second-Life als stationärer Batteriespeicher sowie durch die Nutzung regenerativ erzeugten Stroms deutlich gesenkt werden. Diese Potentiale können beim Ausbau der Ladeinfrastruktur berücksichtigt werden. [4]

Derzeitig installierte Gleichstrom-Schnellladestationen können größtenteils nur mit einer Leistung von maximal 50 kW laden. Bei der steigenden Batteriekapazität in zukünftigen Elektrofahrzeugen verringert dies die Ladezeit jedoch kaum. Ziel sollte eine Ladeleistung von 350 kW sein, sodass pro Minute knapp 30 km Reichweite geladen werden können. Zur Wartezeitverkürzung müssen pro Ladestation mehrere Ladesäulen angeboten werden. Die Schnellladestation, deren Gesamtleistung somit im Bereich mehrerer Megawatt liegt, muss dann ans Mittelspannungsnetz angeschlossen werden. Um die fehlende Anschlussleistung des Netzes auszugleichen, muss entweder das Netz ausgebaut (zusätzl. Transformatoren und Kabel) oder die Differenz zur benötigten Leistung durch einen Batteriespeicher auf der Niederspannungsseite ausgeglichen werden. In ersten Untersuchungen zeigte sich, dass bei größeren Schnellladestationen der Netzausbau die günstigere Variante ist. Bei kleinen Schnellladestationen in schwach ausgebautem Netzgebiet ist hingegen der Batteriespeicher günstiger. Sein größter Vorteil ist der modulare Aufbau, sodass die Schnellladestation schnell aufgebaut und einfach erweitert werden kann. Diese Flexibilität ist besonders in der Anfangsphase der Elektromobilität wichtig, da die Positionierung der Schnellladestationen und ihre prognostizierte Nutzung derzeit noch aufgrund der fehlenden Daten unsicher ist. [5]

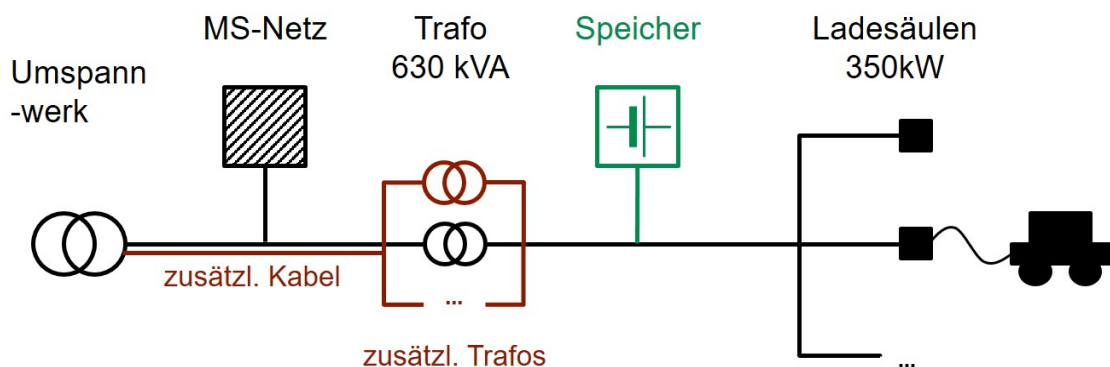


Abbildung 1: Möglichkeiten der Netzanbindung einer Schnellladestation:  
rot-Netzausbau, grün: Batteriespeicher

Eine Alternative stellt die rein regenerativ betriebene Schnellladestation dar: Hier wird die Schnellladestation mit einem Batteriespeicher direkt an die Übergabestation eines nahegelegenen Windparks angeschlossen. Dabei muss der Batteriespeicher nun nicht nur die fehlende Anschlussleistung, sondern auch die fluktuierende Einspeisung ausgleichen, wird also größer und teurer. Allerdings entfallen durch die strikte Trennung vom Netz der handelsübliche Strompreis und die Netzentgelte, sodass bei dieser Variante ähnliche Kosten pro geladenen Kilowattstunde entstehen, wie bei den zuvor untersuchten. [5]

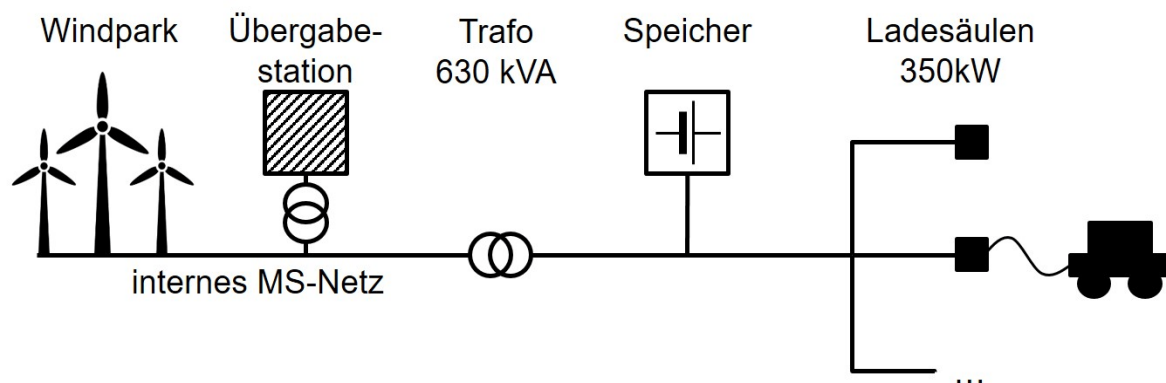


Abbildung 2: Anschluss einer Schnellladestation an einen Windpark

Enercon und Powerinnovation stellten im März 2018 mit dem E-Charger 600 eine Schnellladelösung vor, die ihre Systemleistung von 600 kW flexibel auf bis zu vier Ladesäulen aufteilen und so jedes Fahrzeug mit der angeforderten Leistung von bis zu 350 kW laden kann. Durch die Nutzung einer intelligenten Schnittstelle zum Netz kann dieses System zur Netzstabilität beitragen und durch den Einsatz eines Batteriespeichers auch in schwach ausgebauten Netzen genutzt werden. [6]

**Lösungsweg:** Für die Untersuchungen sind mehrere Schritte notwendig:

Zuerst muss das Nutzerverhalten an der Schnellladestation modelliert werden. Dafür ist die Auswertung von Mobilitätsstatistiken und der Vergleich mit Daten bereits vorhandener Ladestationen notwendig. Dieses Modell soll die zeitliche Verteilung der Fahrzeuge, die die Schnellladestation nutzen, abbilden und mit der Anzahl an Ladesäulen skaliert werden können. Zweitens sollen anhand einer Beispielsraststätte die oben beschriebenen Möglichkeiten der Netzanbindung näher untersucht werden:

- direkte Anbindung ans Mittelspannungsnetz und damit verbundener notwendiger Netzausbau
- Nutzung der vorhandenen Anschlussleistung mit einem Batteriespeicher zum Ausgleich der Leistungsspitzen
- Entkopplung vom öffentlichen Netz und Anbindung an die Übergabestation eines nahegelegenen Windparks mit einem Batteriespeicher zum Ausgleich der Leistungsspitzen

Dafür werden Netzberechnungen durchgeführt und die Schnellladestation mit dem zuvor erstellten Nutzungsmodell zur Auslegung des Batteriespeichers simuliert. Anschließend sollen die Ergebnisse des Beispiels nach Möglichkeit auf allgemeine Aussagen übertragen werden. Drittens wird die Umsetzung vor Ort untersucht: Insbesondere bei der Nutzung eines Batteriespeichers und gegebenenfalls einer regenerativen Erzeugungsanlage werden alle Komponenten der Schnellladestation mit Gleichstrom betrieben. Die Übertragung zwischen den Komponenten könnte also auch über ein Gleichstrom-Inselnnetz erfolgen, welches über einen einzelnen Umrichter an das Verteilnetz angeschlossen ist. Dies spart einerseits Verluste durch das Wechselrichten und anschließende Gleichrichten, andererseits können die Ladesäulen, der Batteriespeicher und die Erzeugungsanlage besser aufeinander abgestimmt werden und die gesamte Anlage netzdienlich angeschlossen werden.

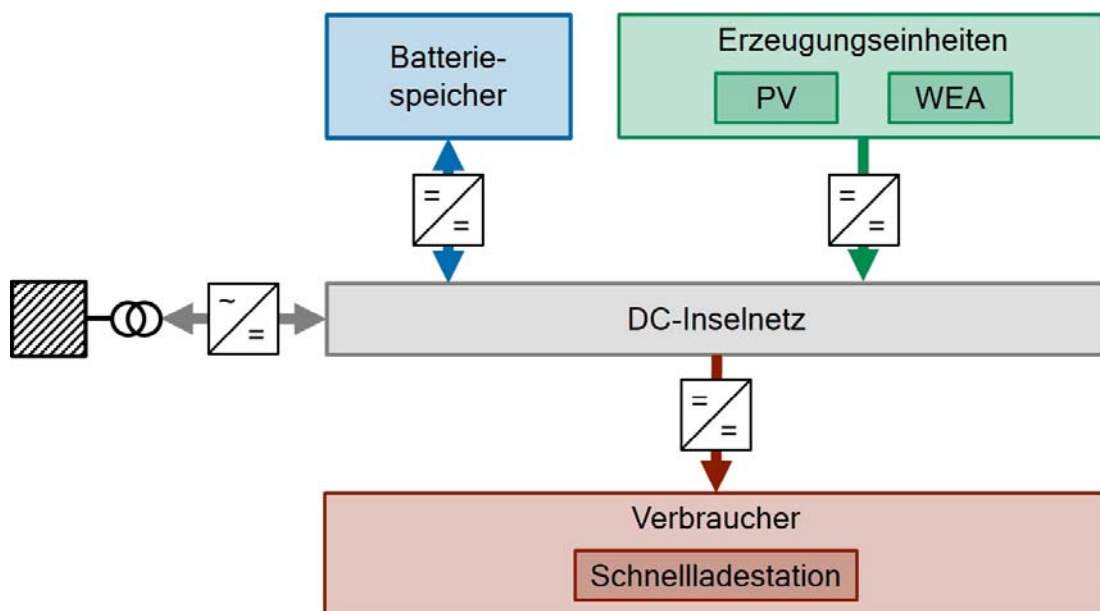


Abbildung 3: Systemskizze eines DC-Inselnetzes



**Projekt:** Netzanbindung von Schnellladestationen

---

**Projektstand:** Das Projekt befindet sich noch in der Anfangsphase, in der die Themen näher definiert und eingegrenzt werden. Dafür werden zentrale Fragestellungen formuliert und bereits vorhandene Untersuchungen recherchiert.

- Publikationen:**
- [1] Bundesministerium für Umwelt Naturschutz Bau und Reaktorsicherheit, „Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung“, Berlin, 2016.
  - [2] V. Quaschnig, „Sektorkopplung durch die Energiewende - Anforderungen an den Ausbau erneuerbarer Energien zum Erreichen der Pariser Klimaschutzziele unter Berücksichtigung der Sektorkopplung“, Berlin, 2016.
  - [3] A. Kampker, D. Vallée, und A. Schnettler, *Elektromobilität - Grundlagen einer Zukunftstechnologie*. Aachen: Springer, Berlin, Heidelberg, 2013.
  - [4] D. Hall und N. Lutsey, „Effects of battery manufacturing on electric vehicle life-cycle greenhouse gas emissions“, 2018.
  - [5] N. Kreth, „Netzanbindung von Schnellladestationen an Autobahnen“, Technische Universität Clausthal, 2017.
  - [6] D. Bönnighausen, „E-Charger 600: Enercon nimmt HPC-Ladesystem in Betrieb“, *electrive.net*, 2018. Verfügbar unter: <https://www.electrive.net/2018/03/14/e-charger-600-enercon-nimmt-hpc-ladesystem-in-betrieb/>, zugegriffen: 19.04.2018.

**Bearbeiter:** Nils Kreth, M. Sc. (Tel: 72-3597)  
nil.kreth@tu-clausthal.de

**Projektleiter:** Dr.-Ing. E.-A. Wehrmann (Tel: 72-2595)  
wehrmann@iee.tu-clausthal.de



**Projekt:** Wind-Solar-Wärmepumpen-Quartier

---

**Projekt:** Wind-Solar-Wärmepumpen-Quartier - Erneuerbar betriebene Wärmepumpen zur Minimierung des Primärenergiebedarfs (WpuQ)

Teilvorhaben: Elektrische Verteilnetze für Wärmepumpenquartiere

**Ziel:** Das übergeordnete Ziel des Verbundprojekts ist eine fundierte Antwort auf die Frage, welche Primärenergieeinsparungen mit koordiniert betriebenen Wind-Solar-Wärmepumpen-Quartieren erreichbar sind.

Ziel des Teilvorhabens "Elektrische Verteilnetze für Wärmepumpenquartiere" ist zunächst die Ermittlung zeitlich hochaufgelöster elektrischer Lastprofile von Wohngebäuden mit Wärmepumpen, um daraus im nächsten Schritt die Belastung des elektrischen Verteilnetzes in durch Wärmepumpen und EE-Anlagen geprägte Quartieren zu ermitteln. Unter Einbeziehung verschiedener Wärmepumpenregelstrategien, innovativer Netzbetriebsmittel (z.B. rONT) und Speichern sollen Auslegungsregeln für elektrische Verteilnetze abgeleitet werden.

**Stand der Technik:** Die Auswirkungen des Einsatzes von Wärmepumpen auf das elektrische Verteilnetz wurden bereits in verschiedenen Arbeiten untersucht (vgl. u. a. [1], [2], [3], [4], [5]). Der Fokus dieser Arbeiten liegt hauptsächlich auf der Erstellung einer Simulationsumgebung für die kombinierte elektrische und thermische Simulation der im Verteilnetz angeschlossenen Verbraucher (elektrische Haushaltlasten) und dem thermischen System der zugehörigen Gebäude. Hierbei wird nur eine Verteilnetztopologie betrachtet.

Mit Ausnahme von [3] werden aus den erhaltenen Ergebnisse jedoch keine allgemeinen Aussagen bezüglich der Belastung des elektrischen Verteilnetzes durch den (koordinierten) Betrieb von Wärmepumpen abgeleitet. Ein Vergleich mit anderen Optionen zur Steigerung des Vorortverbrauchs der lokal bereitgestellten PV-Energie (z.B. durch PV-Hausspeichersysteme) bzw. zur lokalen Spannungshaltung (z.B. durch den Einsatz von regelbaren Ortsnetztransformatoren) bleibt in den genannten Arbeiten unberücksichtigt.

**Lösungsweg:** Auf Basis von im Projekt erhobenen Messdaten aus zwei ausgewählten Quartieren, eines mit Sole-Wärmeverteilstrom und eines mit Luft als dezentrale Wärmequelle, werden Modelle für den elektrischen und thermischen Bedarf in durch EE-Anlagen und Wärmepumpen geprägten Quartieren erstellt. Dabei wird auch die Gleichzeitigkeit des Bedarfs der Gebäude untereinander und des Bedarfs mit der lokal erzeugten elektrischen Energie aus Wind- und Solarenergie bestimmt.

---

Einerseits werden die veränderten Anforderungen an elektrische Verteilnetze mit hohem Anteil an Wärmepumpen und EE-Anlagen werden bestimmt. Andererseits werden die Auswirkungen von Regelungsstrategien der Wärmepumpen auch unter Einbeziehung von thermischen und elektrischen Speichern auf den Deckungsanteil durch erneuerbare Energien einerseits und die damit verbundenen Investitionskosten andererseits evaluiert.

Somit werden neben den technischen Anforderungen auch die Wirtschaftlichkeit des Betriebs der Wärmeversorgung unter Einbeziehung der verwendeten Quellen für die Wärmepumpen und den potentiell zu ergreifenden Maßnahmen im elektrischen Verteilnetz bewertet.

Die erhaltenen Ergebnisse sollen in einem Planungsleitfaden und vereinfachten Berechnungsmodellen zusammengefasst und Kommunen, Planern und Netzbetreibern zur Verfügung gestellt werden. Somit können sie als Hilfestellung zu dienen, um dezentrale regenerative Wärmeversorgung in Neubau- und Bestandsquartieren umzusetzen.

**Projektstand:** Während des ersten Projektquartals wurde seitens des IEE gemäß der Arbeitsplanung im Projekt mit der Erstellung der Simulationsumgebung für die Durchführung der elektrischen Lastflussrechnung begonnen.

- Reverences:**
- [1] R. Baetens, “On Externalies of Heat Pump-Based Low-Energy Dwelings at the Low-Voltage Distribution Grid”, Dissertation , KU Leuven, Leuven, 2015
  - [2] M. Brunner, “Auswirkungen von Power-to-Heat in elektrischen Verteilnetzen”, Dissertation, Universität Stuttgart, 2017
  - [3] C. Protopapadaki and D. Saelens, “Heat pump and PV impact on residential low-voltage distribution grids as a function of building and district properties”, Applied Energy, vol. 192, pp. 268-281, 2017
  - [4] S. Tenbohlen, M. Brunner, M. Schmidt and T. Henzler, “Be-und Entlastung elektrischer Verteilnetze durch Wärmepumpen bei der Wärmeerzeugung”, Universität Stuttgart, Sep. 2015,  
[Online] Available: [http://www.zfes.uni-stuttgart.de/deutsch/downloads/Endbericht\\_Netzbelastung\\_W%C3%A4rmepumpen.pdf](http://www.zfes.uni-stuttgart.de/deutsch/downloads/Endbericht_Netzbelastung_W%C3%A4rmepumpen.pdf)  
Accessed on: Mar. 08.2016
  - [5] S. Koch and B. Engel, “Auswirkungen einer netzdienlichen Betriebsweise von Wärmepumpen auf ein PV-dominiertes Neubaugebiet”, in Sektorenkopplung der Energiesysteme durch Power to Heat: Dialogplattform des EFZN, Goslar, 14. und 15. Juni 2016, 2016, pp. 34-47

**Projekt:** Wind-Solar-Wärmepumpen-Quartier

---

**Projektpartner:** Am Verbundprojekt sind folgende Institute und Unternehmen beteiligt:

- Institut für Solarenergieforschung (Verbundkoordinator)
- Stiebel Eltron
- Energieservice Westfalen Weser
- Institut für elektrische Energietechnik und Energiesysteme

**Projektlaufzeit:** 15.08.2017 - 14.08.2020

**Gefördert durch:** Das Projekt wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert.



**Bearbeiter:** Dipl.-Ing. Verena Spielmann (Tel: 72-2594)  
verena.spielmann@tu-clausthal.de

**Projektleiter:** Prof. Dr.-Ing. H.-P. Beck (Tel.: 72-2570)  
info@iee.tu-clausthal.de

Dr.-Ing. E.-A. Wehrmann (Tel: 72-2595)  
wehrmann@iee.tu-clausthal.de



**Problem:** Die bisherige Systematik zur Verteilung der Netzkosten auf die Netznutzer wird mit dem Voranschreiten der Energiewende zunehmend vor neue Herausforderungen gestellt. Ein wesentlicher Treiber der Diskussion zur Netzentgeltsystematik ist die dezentrale Erzeugung. Das Energieversorgungssystem besteht zunehmend weniger aus großen zentralen Kraftwerken, die in das Übertragungsnetz einspeisen. Vielmehr findet die Erzeugung im Zuge der Energiewende vermehrt auf dezentraler Ebene im Verteilnetz statt. In einigen Regionen verursacht die dezentrale Einspeisung ebenfalls bereits eine Umkehrung des Wirkleistungsflusses. Insbesondere die Standorte der regenerativen Erzeugungsanlagen werden primär nach erzeugungsspezifischen Kriterien und nicht nach verfügbaren Netzkapazitäten gewählt. Folglich wird der auslegungsrelevante Netzkapazitätsbedarf in vielen Regionen zunehmend durch die Einspeisung bestimmt. Die Kosten für den dadurch notwendigen Netzausbau auf den unteren Spannungsebenen steigen.

Aufgrund des derzeitigen rein Top-Down verlaufenden Kostenwälzungsmechanismus der Netzentgeltsystematik müssen diese zusätzlichen Kosten allein von den lokalen Verbrauchern getragen werden. Es ergeben sich daraus unter anderem über die Bundesrepublik Deutschland verteilt sehr unterschiedlich hohe Netzentgelte. In Regionen mit einem hohen Anteil erneuerbarer Energien ist die finanzielle Belastung der Verbraucher daher tendenziell höher. Der derzeitige Verteilungsmechanismus basierend auf der Kostenwälzung führt folglich im Zuge der Energiewende, bedingt durch den Ausbau der EE-Erzeuger, zunehmend dazu, dass diese energiewendebedingten Investitionen lediglich lokal getragen werden. Vor dem Hintergrund, dass die Energiewende anerkanntermaßen ein gesamtgesellschaftlich gewolltes Projekt ist, scheint die heutige Netzentgeltsystematik nicht mehr verursachungsgerecht die derzeitige stromwirtschaftliche Entwicklung abzubilden.

**Ziel:** Um diesen Herausforderungen zu begegnen sind neue und langfristig tragfähige Ansätze der Netzentgeltsystematik zu entwickeln, die einerseits eine faire Verteilung der Infrastrukturkosten ermöglichen, andererseits das Ziel der Energiewende, ein kosteneffizientes CO<sub>2</sub>-Emissionsfreies Energiesystem zu erreichen, unterstützen oder zumindest nicht behindern.

**Stand der Technik:** Da die Netzentgelte einen wesentlichen Anteil (ca. 20-25 %) des Strompreises für Haushaltskunden ausmachen und die erforderlichen Investitionen mit dem Ausbau der erneuerbaren Erzeugungsanlagen zunehmend steigen, wird die Netzentgeltsystematik derzeit sowohl auf wissenschaftlicher als auch auf energiepolitischer Ebene diskutiert. Insbesondere die Einführung von Einspeiseentgelten, die Abschaffung der vermiedenen Netznutzungsentgelte, die Erhöhung der Leistungskomponente und weitere Ansätze werden dabei häufig angeführt und zumindest qualitativ bewertet. Im Rahmen des Projektes „Weiterentwicklung der Netzentgeltsystematik Strom in Deutschland“ werden auf Grundlage der stromwirtschaftlichen Gegebenhei-

ten neue Lösungsansätze theoretisch erarbeitet und anhand realer Daten eines Verteilnetzgebiets untersucht.

**Lösungsweg:** Um insbesondere die regionale Spreizung hinsichtlich der Höhe der Netzentgelte zu mindern, wurde ein Lösungsansatz untersucht, der auf Basis der stromwirtschaftlichen Daten die Netzausbaukosten auf einen größeren Verbraucherkreis verteilt. Mit Hilfe der „bidirektionalen Kostenwälzung“ sollen die Verbraucher der vom EE-Ausbau stark betroffenen Regionen finanziell entlastet werden. Der Ansatz sieht vor, dass sich die Kostenwälzung nicht mehr am hierarchischen Wirkleistungsfluss orientiert, sondern den tatsächlichen Lastfluss abbildet. Dies bedeutet, dass die Netzkosten sowohl entlang des von oben nach unten gerichteten Lastflusses umverteilt werden als auch entlang des Lastflusses von einer unteren Spannungsebene in eine vorgelagerte Netzebene.

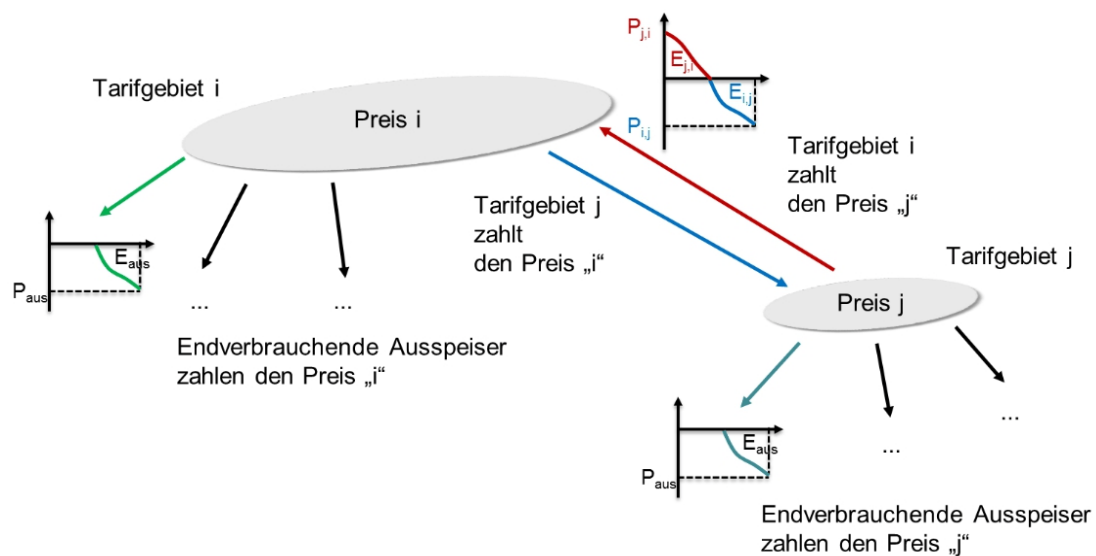


Abbildung 1: Leistungs- und Kostenflüsse der bidirektionalen Kostenwälzung (1)

Aus diesem Ansatz resultiert, dass sich Tarifgebiete in Abhängigkeit der Nutzung gegenseitig Kosten in Rechnung stellen (vgl. Abbildung 1). Das Ziel ist folglich, die zusätzlichen Netzausbaukosten entlang des Wirkleistungsflusses in die Verteilnetze anderer Betreiber umzuverteilen.

Die bidirektionale Kostenwälzung wurde anhand realer Daten verprobt. Der untersuchte Datensatz spiegelt einen Verteilnetzbetreiber wider, in dessen Netzgebiet eine hohe dezentrale Einspeisung durch erneuerbare Energien-Anlagen und eine Rückspeisung bis auf die Übertragungsnetzebene stattfindet.



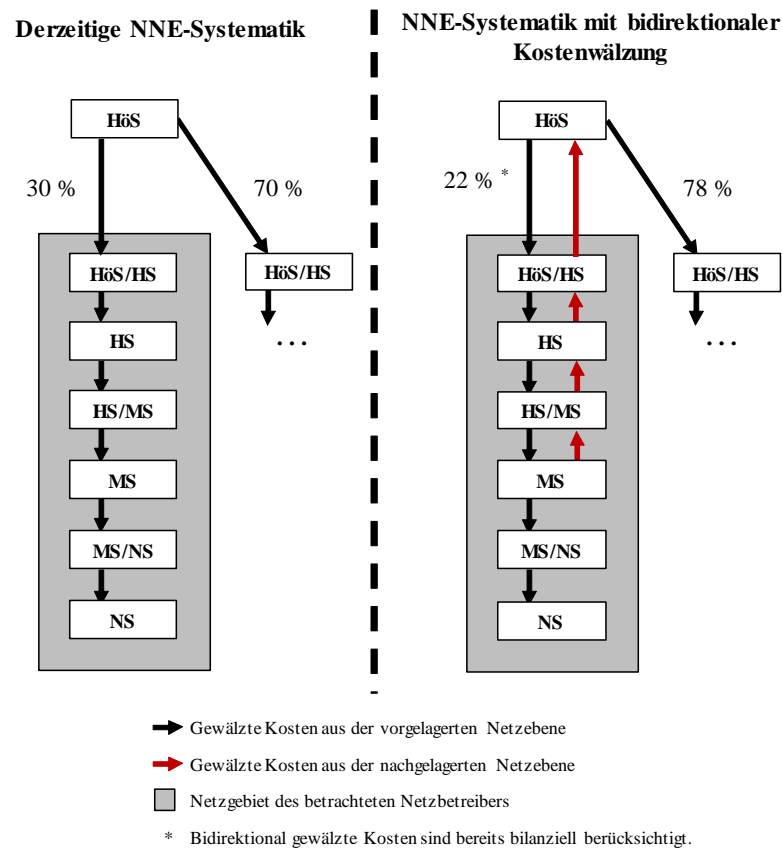


Abbildung 2: Anteil der Netzkosten der Höchstspannungsebene, die in das betrachtete Verteilnetz gewälzt werden [1]

Im Ergebnis können, wie in Abbildung 2 dargestellt, Kosten aus dem untersuchten Netzgebiet über das Übertragungsnetz in andere Verteilnetze umverteilt werden. Im aktuellen System werden folglich 30 % der Gesamtkosten des vorgelagerten Übertragungsnetzes in das betrachtete Netzgebiet gewälzt. Unter Anwendung der bidirektionalen Kostenwälzung können ebenfalls Kosten aus dem Verteilnetz in das Übertragungsnetz gewälzt werden, sodass bilanziell betrachtet nur noch 22 % der Gesamtkosten der Übertragungsnetzebene in das untersuchte Verteilnetz gewälzt werden. Als unerwünschter Nebeneffekt dieses Ansatzes findet jedoch auch innerhalb des analysierten Netzgebietes eine Kostenumverteilung statt. So werden die Endkunden der unteren Spannungsebenen finanziell entlastet, während die Endkunden der Umspannebene Höchstspannung/Hochspannung etwas höher belastet werden. Dieser Effekt kann unter anderem auf die Gleichzeitigkeitsfunktion zurückgeführt werden, die in diesem Modellansatz nur noch bedingt die ursprünglichen Annahmen zum Zusammenhang von Gleichzeitigkeit und Ausnutzungsdauer abbildet. Die bidirektionale Kostenwälzung erreicht somit das Ziel der Kostenum-

---

verteilung auf Grundlager einer stromwirtschaftlichen Basis. Weitere Untersuchungen sind jedoch hinsichtlich der Verbindung von bidirektionaler Kostenwälzung und der Gleichzeitigkeitsfunktion erforderlich.

**Projektstand:** Neben der Herausforderung zum bereits untersuchten Kostenwälzungsmechanismus sind im derzeitigen Netzentgeltsystem weitere Komponenten in Frage zu stellen. Unter anderem muss analysiert werden, ob die Gleichzeitigkeitsfunktion als funktioneller Zusammenhang der individuellen Gleichzeitigkeit und Ausnutzungsdauer noch ein geeigneter Ansatz zur Verteilung der Kosten auf einen Arbeits- und einen Leistungsanteil darstellt. Diese und weitere Aspekte der Netzentgeltermittlung werden derzeit untersucht.

**Literatur:** [1] Koring, K.; Maubach, K.-D.; Beck, H.-P. (2017): Fehlallokationen der Netzkosten zwischen Tarifgebieten und Kundengruppen – Weiterentwicklung der Netzentgeltsystematik Strom, in: ew Magazin für die Energiewirtschaft 7/2017, S. 22-25.

**Bearbeiter:** Dipl.-Wirtsch.-Ing. Karolina Koring (Tel: 05321/3816-8101)  
karolina.koring@efzn.de

**Projektleiter:** Prof. Dr.-Ing. H.-P. Beck (Tel: 72-2570)  
info@iee.tu-clausthal.de

Prof. Dr.-Ing. K.-D. Maubach

## **Projektübersicht**

---

Projektleiter: Dr.-Ing. Dirk Turschner  
Tel.: +49-5323-72-2592  
E-Mail: turschner@iee.tu-clausthal.de

### **Arbeitsgruppe Leistungsmechatronik**

#### **Forschungsschwerpunkte und Projekte**

Mechatronik beinhaltet das Zusammenwirken der klassischen Ingenieurwissenschaften Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik. Entsprechend vielfältig sind die Forschungsschwerpunkte innerhalb der Arbeitsgruppe. Sie reichen von der klassischen elektrischen Antriebstechnik, über Leistungselektronik bis zur Energiekonditionierung in elektrischen Netzen und die Beobachtung unbekannter Zustandsgrößen. Neben den genannten Aspekten, ist das Zusammenspiel zwischen elektrotechnischen und mechanischen Komponenten von zentraler Bedeutung.

Es ergeben sich hieraus für die Arbeitsgruppe verschiedene Forschungsschwerpunkte:

1. Bereitstellung verschiedener Systemdienstleistungen für die Stabilisierung elektrischer Netze mit Hilfe moderner leistungselektronischer Komponenten (Prinzip Virtuelle Synchronmaschine - VISMA)
2. Entwicklung und Erprobung innovativer Ladegeräte und Ladealgorithmen für Elektrofahrzeuge, um damit einen Beitrag zur dynamischen Systemstabilität elektrischer Netze liefern zu können.
3. Monitoring von Netzzuständen (Inselnetz- und Netzparallelbetrieb) und Netzzustandsgrößen
4. Erweiterung der VISMA-Funktionalität zur Nutzung als unterbrechungsfreie Stromversorgung

- **Schaufenster Elektromobilität: Tanken im Smart Grid**

- Erprobung innovativer Ladegeräte und Ladealgorithmen für Elektrofahrzeuge zur Bereitstellung von standortabhängigen dezentralen Systemdienstleistungen
- Einsatz des Fahrzeugspeichers als Momentanreserve und zur Primärregelung
- Erfassung des aktuellen Zustandes des lokalen Netzbereiches durch das Fahrzeug im netzgekoppelten Zustand
- Erstellung einer *Power Quality Map*
- Prosumerzellenoptimierung mit dem Fahrzeugspeicher

- **Zustandsschätzer für Lastflüsse in Niederspannungsnetzen**

- Entwicklung eines Verfahrens zur Schätzung von nicht gemessenen Zustandsgrößen eines elektrischen Netzes zur Einsparung von Netzinfrastuktur
- Untersuchung des an der TU Clausthal entwickelten *Knotenlastbeobachters* auf Eignung zur Rekonstruktion fehlender Netzdaten im Niederspannungsnetz
- Erprobung des Verfahrens mit Hilfe verschiedener Testdatensätze von elektrischen Netzen mit unsymmetrischen Verbrauchern unterschiedlicher Struktur und unter Zuhilfenahme verschiedener Standardlastprofile

- **USV-VISMA**

- Erkennen von Netzfehlern und sichere Trennung vom fehlerhaften Netz
- Sicheres Umschalten der VISMA vom Netzparallel- in den Inselbetrieb
- Sichere Versorgung einer Last im Inselbetrieb, ähnlich einer rotierenden unterbrechungsfreien Stromversorgung
- Nachbildung der verschiedenen Szenarien in der Simulation und Validierung am Prüfstand

## Projektübersicht

- 
- **Entwicklung eines innovativen Umrichtersystems mit Speicher zur Eigenbedarfs-optimierung und Netzstabilisierung**
    - Erprobung eines Vier-Zweige-Umrichters auf SiC-Basis zur Symmetrierung elektrischer Netze
    - Kombination einer dreidimensionalen Raumzeigermodulation mit dem VISMA-Modell
    - Erprobung des Umrichters mit Batteriespeicher im Versuchsnetz
    - Test des Systems bei Glättung von Lastspitzen bei industriellen und gewerblichen Stromverbrauchern zur Senkung der Strombezugskosten
    - Hinführung des Umrichtersystems zur Serienreife



**Projekt:** Tanken im Smart Grid

---

**Problem:** Vor dem Hintergrund abnehmender Kraftwerksleistung aufgrund des Atomausstiegs und der Abschaltung alter Kohlekraftwerke und des zögerlichen Zubaus neuer Großkraftwerke wird das Energieversorgungssystem vor große Herausforderungen gestellt. Zudem ist eine Flexibilisierung des Versorgungssystems wegen der immer steiler verlaufenden Residuallastgradienten notwendig. Darüber hinaus stellt sich die Frage, wie in Zukunft Momentanreserve sowie Primär- und Sekundärregelleistung erbracht werden sollen, die bislang von Großkraftwerken bereitgestellt wurden.

**Ziel:** Ziel des Projektes war die Entwicklung und Erprobung innovativer Ladegeräte und Ladealgorithmen für Elektrofahrzeuge, um damit einen Beitrag zur dynamischen Systemstabilität elektrischer Netze liefern zu können.

**Lösungsweg:** Im Kern der Arbeiten standen Untersuchungen zur Einbindung automobiler Energiespeicher in die elektrische Energieversorgung zur Erbringung von dezentralen, standortabhängigen Systemdienstleistungen.

Des Weiteren wurde die Nutzung der Fahrzeugspeicher zum Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch in den Bilanzgrenzen der Kundenanlage – der sogenannten „Prosumerzelle“ – betrachtet. Hierzu ist eine kommunikative Verbindung des Hauptzählers am Hausanschluss mit dem Fahrzeug und ggf. mit den Erzeugern, wie Photovoltaik-Anlage (PV) oder Blockheizkraftwerk (BHKW), und weiteren steuerbaren Verbrauchern erforderlich.

Ähnliche Projekte nutzen die Speicher von Elektrofahrzeugen als reine Energiespeicher. In diesem Projekt wurde die Nutzung der Fahrzeugbatterien als „Leistungsspeicher“ für die Bereitstellung von Momentanreserve, zur Primärregelung und weitergehende Systemdienstleistungen untersucht.

Aufgrund unterschiedlicher Topologien und lokaler Lastzustände ist für die Parametrisierung der dynamischen Reaktion der Laderegler auf Netzereignisse eine standortbezogene Optimierung der Parameter von Vorteil.

Als mobile Einheiten können Elektrofahrzeug während der netzgekoppelten Phase (Plugged-In) den aktuellen Zustand des lokalen Netzbereiches diagnostizieren und für Netzbetreiber wertvolle Daten erheben. Die erhobenen Daten werden in aggregierter Form als „Power Quality Map“ zur Verfügung gestellt. Im Kontext der Entwicklung hin zum „Smarter Grid“ kann auf diese Weise das Sensornetz für eine Netzüberwachung dichter geknüpft werden, um somit eine weiterhin hohe Versorgungsqualität zu gewährleisten.

Im Rahmen dieses Projektes wurden die beschriebenen drei Funktionalitäten Systemdienstleistungen, Prosumerzellenoptimierung und Power Quality Map untersucht bzw. entwickelt, anhand von Laboraufbauten erprobt und in marktverfügbare Elektrofahrzeuge integriert.

---

**Projektstand:** Das Projekt ist abgeschlossen.

## Ergebnisse:

### **Netzdienliches Ladeverfahren**

Zur Analyse möglicher Szenarien und zur Auslegung eines intelligenten Lademanagements wurde ein vereinfachtes Netzmodell (Abbildung 1) genutzt. Mit Hilfe des Modells können verschiedene Last- und Erzeugungssituationen in einem Niederspannungsnetzausläufer dynamisch simuliert werden. Auf Basis der Simulationsergebnisse können die Auswirkungen des Ladens von Elektrofahrzeugen an verschiedenen Punkten im Netz genauer untersucht werden.

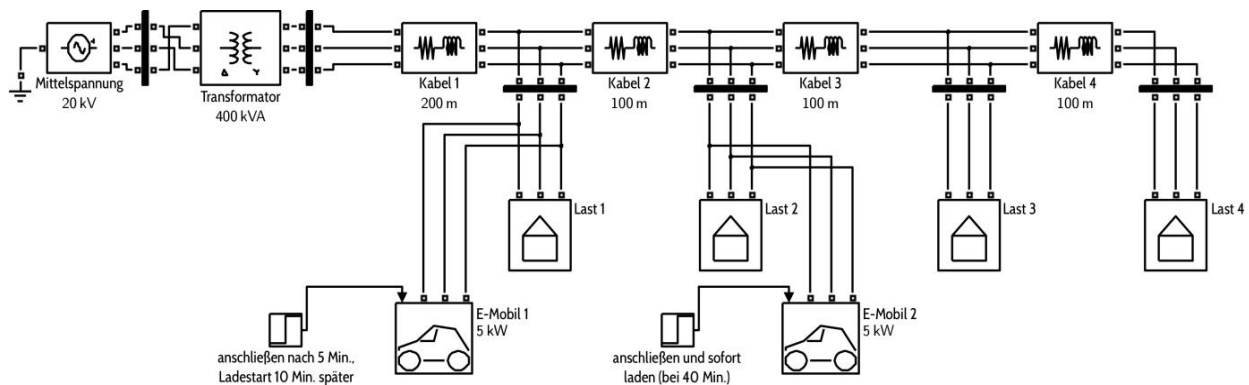


Abbildung 1: Einfaches Netzmodell zur Untersuchung verschiedener Szenarien in Bezug auf Last- und Erzeugungssituationen sowie Anschluss und Ladeverhalten von Elektrofahrzeugen in Matlab/Simulink

Eine Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse für das Laden von zwei Elektrofahrzeugen entsprechend der Anordnung in Abbildung 1 ist in Abbildung 2 dargestellt. Für die erste Simulation (links) wurde von einer Ladung mit konstanter Leistung (Nennleistung) ausgegangen. Bei der zweiten Simulation (rechts) wurde für beide Fahrzeuge das neue, netzdienliche Ladeverfahren angenommen. Beim Vergleich der Spannungsverläufe ist zu erkennen, dass die Spannungseinbrüche mit dem netzdienlichen Ladeverfahren reduziert werden können.



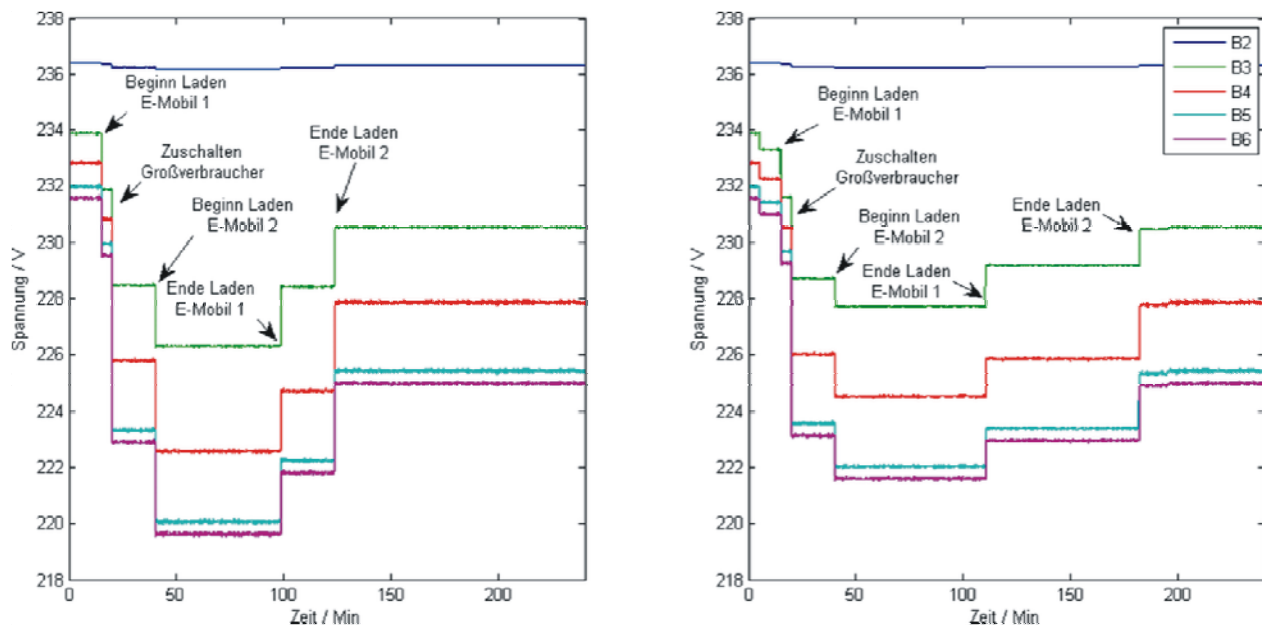


Abbildung 2: Vergleich der Simulationsergebnisse des Ladeverhaltens ohne (links) und mit (rechts) netzdienlichem Ladeverfahren entsprechen Abbildung 1

Die Simulationsergebnisse (Abbildung 2) zeigen, dass sich die Spannungseinbrüche durch das netzdienliche Ladeverfahren reduzieren lassen. Dies geschieht auf Kosten der Ladedauer, was Abbildung 3 verdeutlicht. Wie sich feststellen lässt, steigt die Ladedauer für Fahrzeuge, die weiter hinten am Strang angeschlossen sind, deutlich stärker an als für Fahrzeuge, die weiter vorne angeschlossen sind. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass im einfachsten Fall beim netzdienlichen Laden auf eine feste Nennspannung (z.B. 230 V) geregelt wird. Das bedeutet, dass bei einer Abweichung von dieser Nennspannung die Ladeleistung angepasst wird, z. B. wird mit höherer Leistung, d.h. beschleunigt, geladen, wenn die lokal gemessene Spannung über dem Nennwert liegt. Da die Netzspannung aufgrund des Spannungsabfalls über der Netzleitung grundsätzlich ortsabhängig, d.h. lokal unterschiedlich ist, wird es bei Regelung auf eine feste Nennspannung immer zu örtlichen Ungleichbehandlungen von Fahrzeugen kommen, die sich mit dem netzdienlichen Ladeverfahren an der Netzstabilisierung beteiligen.

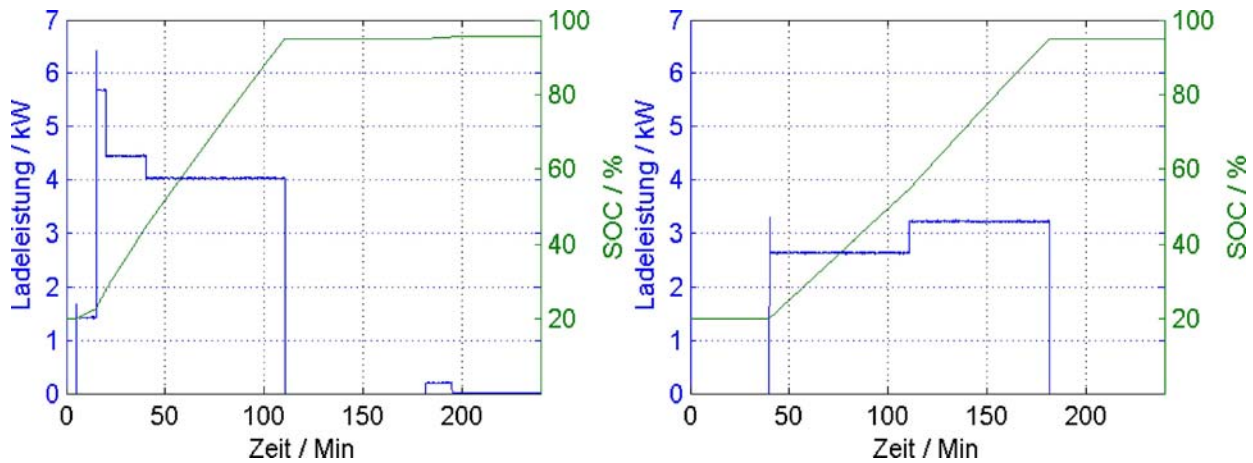


Abbildung 3: Vergleich der Simulationsergebnisse des Ladeverhaltens von Fahrzeug 1 (links) und Fahrzeug 2 (rechts) mit netzdienlichem Ladeverfahren entsprechend Abbildung 1

Um zu verhindern, dass Fahrzeuge, die weiter hinten an einem Netzausläufer laden, grundsätzlich durch eine länger Ladedauer benachteiligt werden, ist es sinnvoll, lokale Nennspannungen für das Ladeverfahren/die Regelung zu definieren. Dies kann über die Power-Quality Map, die ebenfalls im Projekt entwickelt wurde, geschehen.

Die Regelung des Ladegeräts richtet sich nach dem Blockschaltbild in Abbildung 4. Die Ladeleistung wird abhängig von den Abweichungen von Frequenz und Spannung bezogen auf die vorgegebenen Nennwerte ( $f_0^*$ ,  $U_0^*$ ) gegenüber der Nennleistung  $P_0^*$  erhöht oder reduziert. Weiterhin besteht die Möglichkeit die Nennleistung über  $\Delta P_0^*$  für einen Lastausgleich in der Prosumerzelle anzupassen.

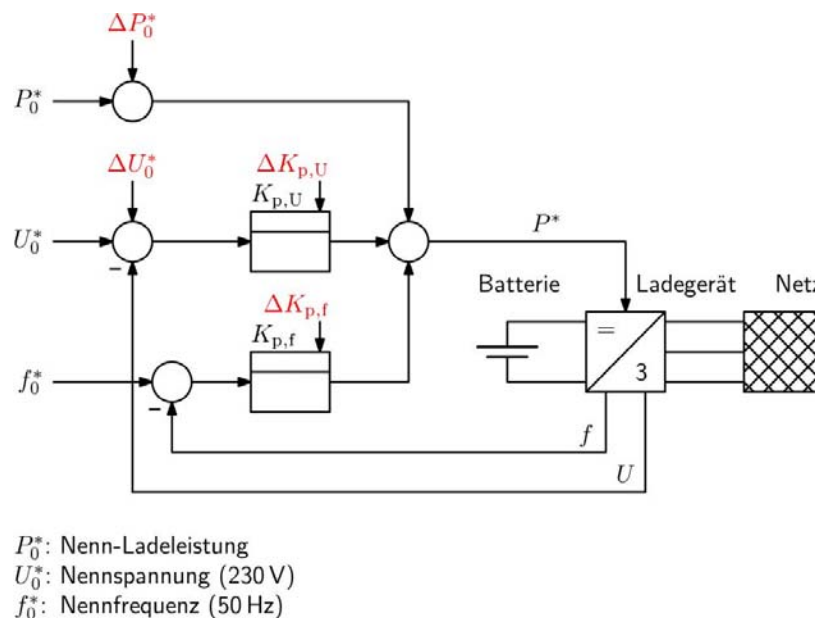


Abbildung 4: Reglerstruktur des netzdienlichen Ladeverfahrens

Die rot markierten Parameter in Abbildung 4 können im Betrieb über die Power-Quality Map nachgeführt werden. Besteht keine Verbindung zur Power-Quality Map arbeitet das Ladegerät eigenständig mit dem fest vorgegebenen Parametersatz. So bleibt das dynamische Verhalten des Ladegeräts und die Reaktionsfähigkeit auf lokale Netzereignisse auch ohne Online-Verbindung erhalten.

### Messwerterfassung und Datenübertragung

Die Anforderungen an die Power-Quality Map zur Speicherung und Visualisierung des orts-aufgelösten Netzzustandes sowie zur Parameteroptimierung des Ladeverfahrens wurden spezifiziert.

Für die Kommunikation mit der Power-Quality Map und zur Datenübertragung zwischen den einzelnen Geräten wurden mit den Projektpartnern die einzelnen Kommunikationswege und die zugehörigen Übertragungsprotokolle definiert.

Für die ortsfeste, genaue Messung der ortsunabhängigen Netzfrequenz im Verbundnetz sowie für die stationäre Messung des lokalen Netzzustandes und des Lastflusses in den Haushalten bzw. den Prosumerzellen wurde eine Messbox entwickelt. Abbildung 5 zeigt eine solche Messbox und einen zugehörigen Messschrieb einer Messung des Netzzustandes.

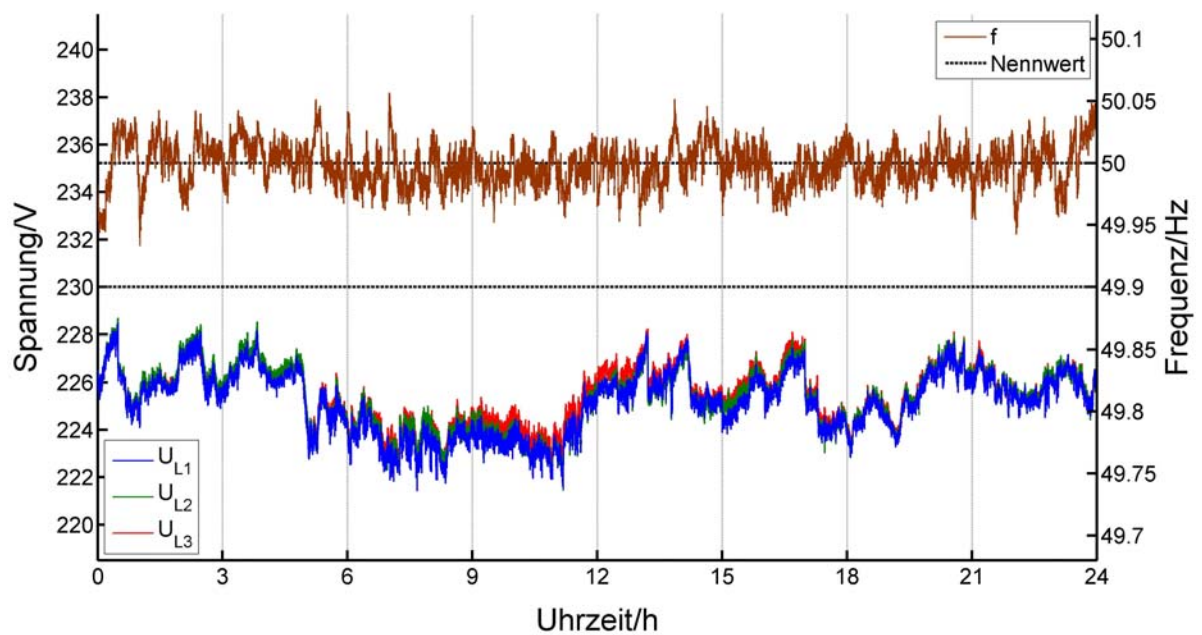
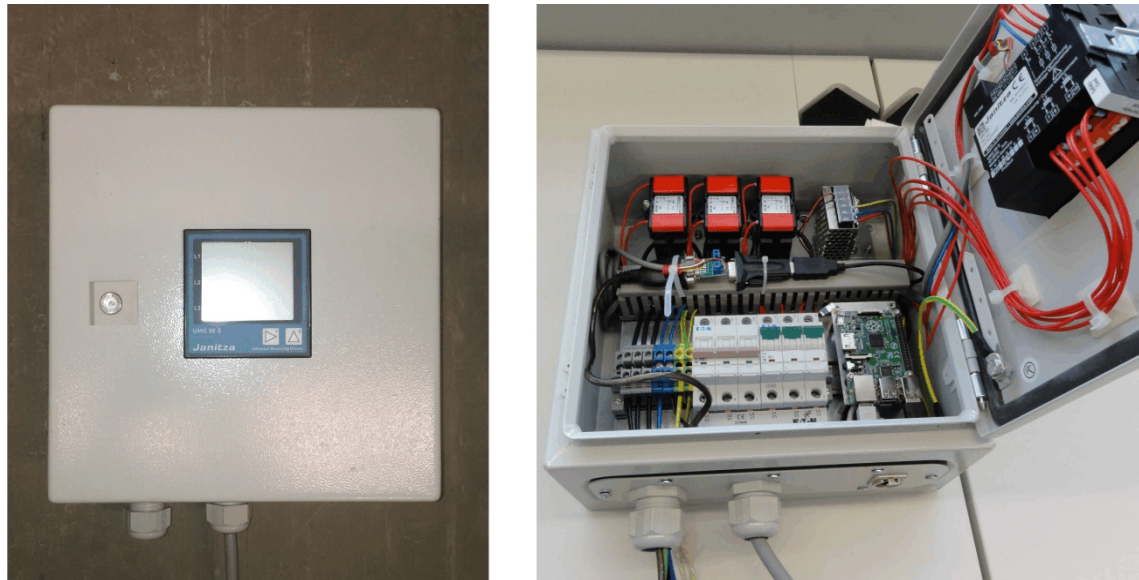


Abbildung 5: (oben) Entwickelte Messbox zur stationären Überwachung des Netzzustandes und Lastflussmessung in der Prosumerzelle mit Anbindung an die Power-Quality Map (unten) mit einer Messbox aufgenommener Netzzustand und Lastfluss

### Entwicklung und Untersuchung der Ladetechnik

Im Rahmen des Projekts wurden drei technische Entwicklungslinien verfolgt:

1. Für das hochschuleigene Versuchsfahrzeug wurde ein rückspeisefähiges Ladegerät nach dem Prinzip der Virtuellen Synchronmaschine (VISMA) entwickelt und aufgebaut.
2. Zusammen mit der FINE Mobile GmbH als Lieferant marktverfügbarer Elektrofahrzeuge wurden zwei Fahrzeuge mit entsprechend modifizierter Ladetechnik zur lastabhängigen Ladeleistungsmodulation aufgebaut.
3. Die RegenerativKraftwerke Harz (RKWH) haben zwei ihre auf Elektroantrieb umgerüsteten Audi A2 um ein dreiphasiges Schnellladegerät, das ebenfalls das netzdienliche Laden unterstützt, erweitert.

Abbildung 6 zeigt das Schema des Ladegeräts, das für das hochschuleigene Versuchsfahrzeug – ein auf Elektroantrieb umgerüsteter Smart-Roadster – entwickelt wurde. Der Ladeumrichter setzt sich aus einem batterieseitigen, bidirektionalen Gleichspannungswandler, für die Anpassung der Batteriespannung von 100 V auf die Zwischenkreisspannung von 770 V, und einem netzseitigen 4-Leiter Puls-Wechsel-/Gleichrichter in Brückenschaltung zusammen.

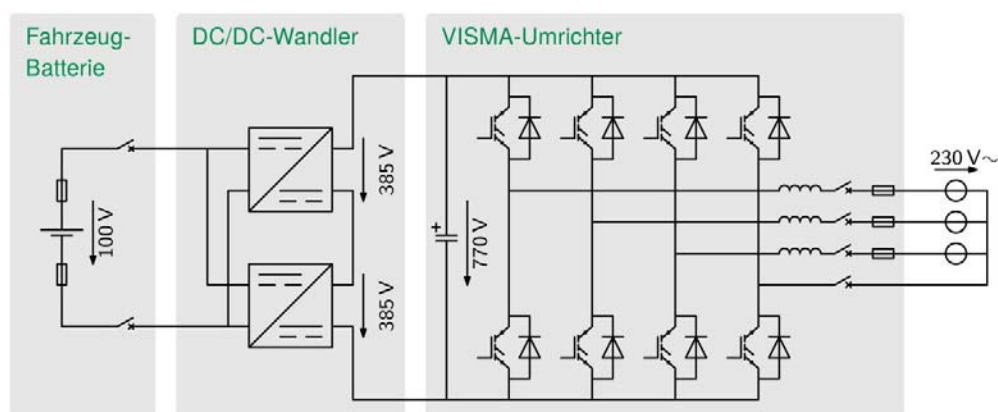


Abbildung 6: Schema VISMA-Ladegerät für den hochschuleigenen Smart Roadster

Die zugehörige Laderegulation ist so konzeptioniert, dass sie netzstützend agiert, ohne auf eine Kommunikation mit einem zentralen Managementsystem angewiesen zu sein. Dazu werden die Netzparameter Frequenz und Spannung ausgewertet und es wird entsprechend der Primärregelung eines Kraftwerks mit einer angepassten Ladeleistung darauf reagiert. Durch eine zusätzliche, nicht zwingend erforderliche Kommunikationsverbindung zur Power-Quality-Map können die Regelparameter standort- und netzparameterabhängig nachgeführt und damit das Ladeverhalten weiter optimiert werden.

---

## Statistische Daten

### Vorhabenbe-

**zeichnung:** Schaufenster Elektromobilität - Tanken im Smart Grid

**Fördernde Stelle:** Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)

**Förderkennzeichen:** 16SNI005D

### Laufzeit des

**Vorhabens:** 01.01.2013 – 30.06.2016

### Verantwortlicher

**Projektleiter:** Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck

**Projektkoordination:** Energie-Forschungszentrum Niedersachsen  
Dipl.-Ing. Frank Mattioli

**Projektpartner:** Technische Universität Clausthal:  
Energie-Forschungszentrum Niedersachsen (EFZN)  
Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme (IEE)  
Institut für Elektrische Informationstechnik (IEI)  
Institut für Informatik (IfI)  
Bornemann AG (BAG)  
Bundesverband Solare Mobilität e.V. (BSM)  
Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V. (FfE)  
Regenerativ Kraftwerke Harz GmbH u. Co. KG (RKWH)

**Bearbeiter:** Dipl.-Ing. Benjamin Schwake  
Dr.-Ing. Raoul Heyne  
Karlo Tkalcec, M. Sc (Tel: 05321/3816-8101)  
karlo.tkalcec@tu-clausthal.de

**Projektleiter:** Dr.-Ing. Dirk Turschner (Tel: 72-2592)  
turschner@iee.tu-clausthal.de



**Projekt:** A new approach to the analysis of network observability in medium and low voltage electrical grids

---

**Problem:** Medium and low voltage electrical power grids are typically sparsely instrumented, and thus, such systems are usually not observable in a systems' theory sense [1-2]. That is, the complete network state cannot be inferred from the available and measured network parameters. The installation of additional measuring equipment is rather costly, which is why optimal strategies for their placement are of great interest. When additional instrumentation of the network is not feasible, typically pseudo-measurements are used for state estimation instead. Owing to their poor accuracy, it is also important to find the useful placements for such pseudo-measurements in order to achieve good overall estimation quality.

**Objective:** A new approach is proposed here which is based on analyzing the characteristic observable and unobservable nodes by using singular value decomposition (SVD) and the breadth-first search method. The aim of the method is to identify all possibilities for the placement of measuring equipment to achieve observability. The proposed method does render the network observable with a minimal number of sensors.

**Approach:** The reason for a network being unobservable is that at some nodes the voltage cannot be computed using the forward and backward sweep in the power flow calculation. These nodes are here defined as breakpoints.

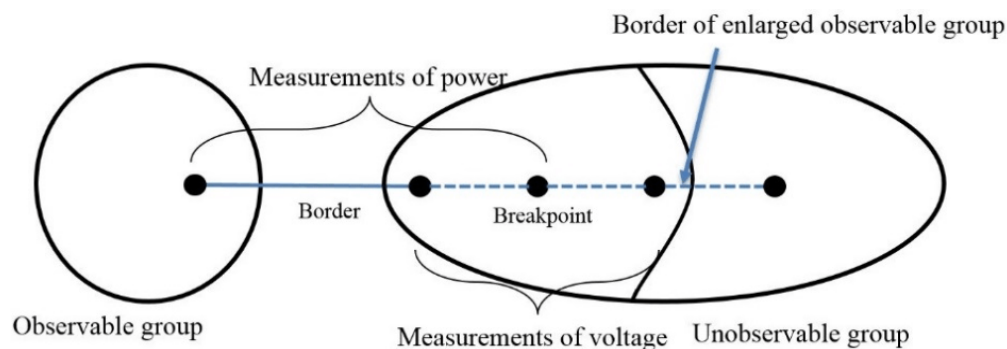


Fig 1: Possible placements of network based on the proposed observability and voltage flow and analysis

The main idea of the here proposed method is that adding power measurements at the nodes between the border of the observable and the unobservable groups and the breakpoint, which is found by SVD, the bread-first search method and virtual measurements, adding voltage measurements at the nodes between the border of observable and unobservable groups and border of enlarged observable group or aggregation the nodes on the sides of border will then convert the unobservable group to an observable one. Thus, these nodes are considered as potential points

---

for the placement of extra measuring equipment, pseudo-measurements or aggregation of nodes. In particular for large networks, this pre-determination of appropriate placement positions reduces the dimensionality for conventional optimal sensor placement algorithms substantially.

**Example:** For illustrating the application of the proposed method, a 16 buses 15 branches network model is employed. The network is shown in the figure below, where positions of power measurements are marked with blue arrows.

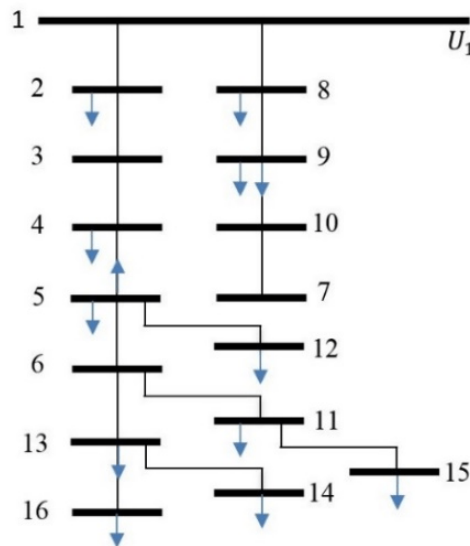


Fig. 2: Topology and measurements of the example network

in this example three additional measurements are required in order to achieve observability. The algorithm deduced that power measuring equipment can be installed respectively between bus 1 and 3 for first group, between bus 6 and 13 for the second group and between bus 10 and 7 for the third group. Or measuring equipment of power can be installed in any bus of the three enlarged groups in Fig. 3



**Projekt:** A new approach to the analysis of network observability in medium and low voltage electrical grids

---

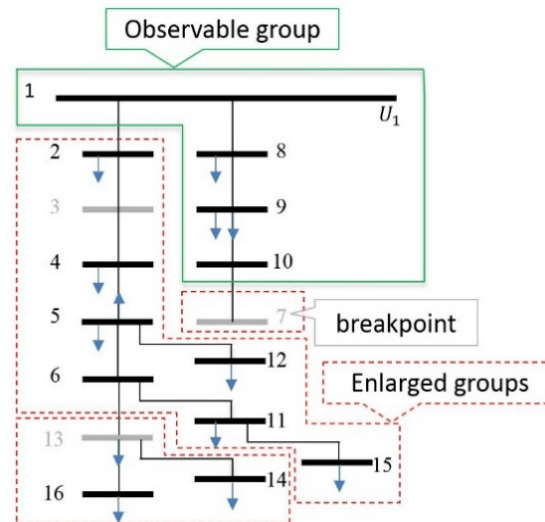


Fig. 3: The Result of algorithm

**Project status:** The Project is finished

**Project partners:**

- Physikalisch technische Bundesanstalt (PTB), Berlin
- National Physical Laboratory (NPL), United Kindom
- Fundación para el Fomento de la Innovación Industrial (FFII), Spain
- Slovenský Metrologický Ústav (SMU), Slovakia
- Dutch Metrology Institute (VSL), Netherlands
- Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos (CIRCE), Spain
- Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Arastırma Kurumu (TUBITAK), Turkey
- Universität Strathclyde, United Kindom
- Technische Universiteit Eindhoven(TU-E), Netherlands
- Technische Universiteit Delft (TU Delft), Netherlands

**Bearbeiter:** Guosong Lin, M. Eng. (Tel: 72-3720)  
guosong.lin@tu-clausthal.de

**Projektleiter:** Dr.-Ing. Dirk Turschner (Tel: 72-2592)  
turschner@iee.tu-clausthal.de

---



**Problem:** Bisher wurde die virtuelle Synchronmaschine im Wesentlichen als Einspeisewechselrichter für regenerative Energien und zum Erbringen von Systemdienstleistungen genutzt. Als Erweiterung der Einsatzbereiche ist die Nutzung der VISMA als unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) denkbar. Aufgabe der VISMA ist das zuverlässige Erkennen von Netzfehlern und deren Auswirkungen auf eine zu schützende Last zu verhindern.

**Ziel:** Das Ziel ist es, den Einsatzbereich der VISMA zu erweitern und sie zukünftig als USV zu nutzen. In Kombination mit einem Energiespeicher und einem Netztrenner soll die VISMA auf Netzfehler reagieren und eine Last vor Einfluss dieser Fehler schützen.

**Stand der Technik:** Die VISMA ist so konzipiert, dass ihr Einsatz auf zwei Bereiche abzielt: als Einspeisewechselrichter und netzstützendes Element. In ihrer erstgenannten Anwendung ermöglicht sie die Einspeisung von erneuerbaren Energien in das Netz mit der Besonderheit Wirk- und Blindleistung getrennt zu regeln. Diese Eigenschaft in Kombination mit der Fähigkeit Spannungs- und Frequenzschwankungen entgegenzuwirken, begründen den zweiten Einsatzbereich der VISMA. Es sollen in erster Linie Systemdienstleistungen erbracht werden um das Netz zu stabilisieren. Das Hauptaugenmerk liegt auf der Momentanreserve.

**Lösungsweg:** In den meisten Fällen werden Anlagen zur unterbrechungsfreien Stromversorgung aus Gleich- und Wechselrichtern mit einem Gleichstrombatteriespeicher ausgeführt. Je nach Art der Verschaltung variieren Komplexität, Aufwand, Kosten und Verluste. Die Firma Piller vertreibt zusätzlich eine USV mit einem rotierenden Konzept. Das Herz der Anlage bildet der sogenannte Uniblock Motor-Generator, eine kompakte Doppelwicklungsmaschine. Motor- und Generatorwicklung sind in einem gemeinsamen Stator untergebracht, ein gemeinsamer Rotor erregt sie. Als wesentliche Vorteile dieser USV sind der hohe Wirkungsgrad, hohe Kurzschlussstrom, Kompensation auch großer Eingangsspannungstoleranzen und die extreme Systemzuverlässigkeit zu nennen. Der Motor-Generator ist über eine Koppeldrossel mit der Zuleitung der Last vom Netz verbunden. Als Energiespeicher dient wahlweise ein Schwungmassenspeicher oder eine Batterie [1].

Die grundsätzliche Idee der USV-VISMA besteht darin, dass der rotierende Teil der Piller-USV durch die VISMA ersetzt wird. Somit wird beabsichtigt möglichst viele Vorteile beider Systeme zu kombinieren.

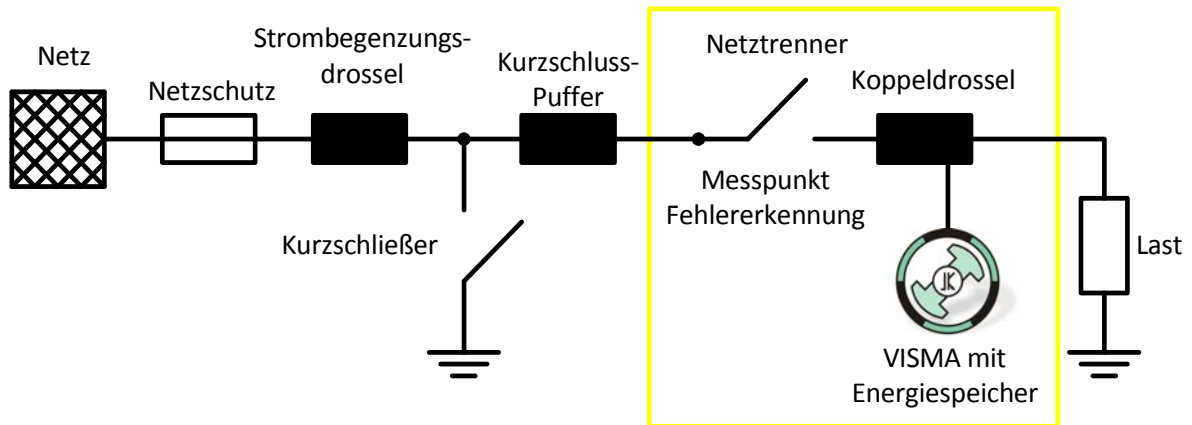


Abbildung 1: Schematischer Aufbau der USV-VISMA, umrandeter Teil: USV

Abbildung 1 stellt den grundsätzlichen Aufbau der USV-VISMA dar. Auf der einen Seite wird dieser simulativ in Matlab/Simulink untersucht, auf der anderen Seite werden die Ergebnisse in einem Versuchsstand experimentell bestätigt.

Das Simulinkmodell bildet den gesamten Aufbau nach. Als VISMA wird das dreiphasige abc-Modell genutzt. Über den Kurzschließer kann zeitgesteuert ein dreiphasiger Kurzschluss mit Erdung erzeugt werden. Die Trennzeit beschreibt die Dauer zwischen Fehlereintritt und Öffnen des Netztrenners. Sie ist einer der wesentlichen Parameter, da die Trennzeit den zeitlichen Verlauf von Erkennung des Netzfehlers bis daraus abgeleiteter Handlung, also Netztrennung, darstellt. Ab dem Zeitpunkt der Netztrennung versorgt die VISMA die Last im Inselbetrieb, d. h. als USV.

Der VISMA-Kurzschlussdauerstrom wird durch die Stromtragfähigkeit der Hardwarekomponenten bestimmt, was zur Folge hat, dass die VISMA nicht genug Kurzschlussdauerstrom einspeisen kann. Jedoch besteht die Möglichkeit die Parameter im abc-Modell zu variieren. Wird der Statorwiderstand geschickt angepasst, ist es möglich die Transiente des VISMA-Ausgangsstroms zu nutzen, um während der Trennzeit einen genügend großen Strom einzuspeisen. Abbildung 2 verdeutlicht diesen Zusammenhang, links mit den Standardparametern des Modells, rechts mit den angepassten Werten. Der Spannungseinbruch zwischen dem Kurzschluss bei 10 s und der Netztrennung bei 10,1 s im Bild rechts oben ist so gering, dass er akzeptabel ist.

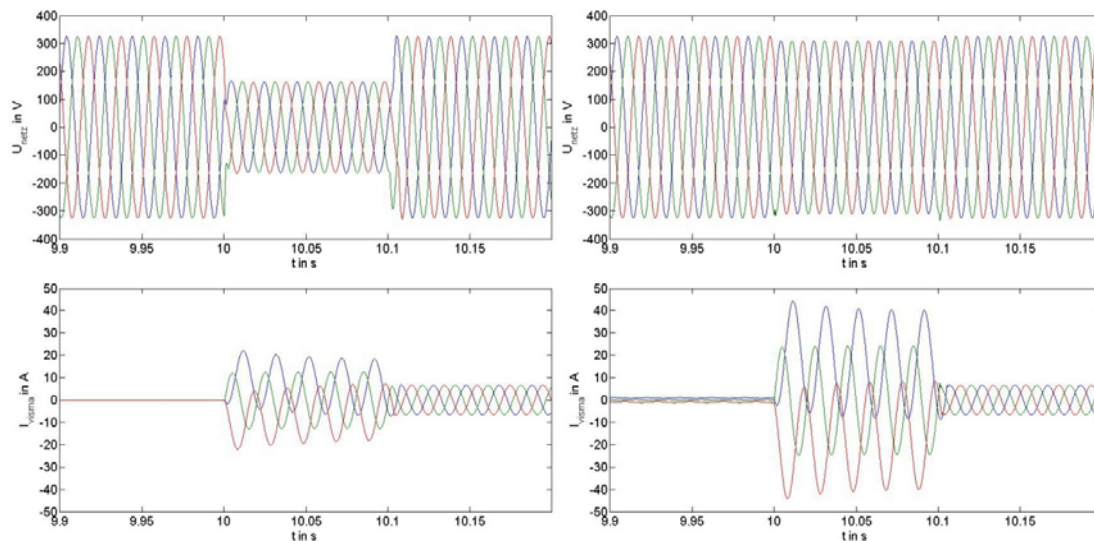


Abbildung 2: Simulierter Verlauf der Netzspannung  $U_{\text{netz}}$  (oben) und des VISMA-Stroms  $I_{\text{visma}}$  (unten) über die Zeit mit Standardparametern (links) und angepassten Parametern (rechts).

In der Simulation kann die VISMA die Last nach der Auftrennung vom Netz weiter versorgen, also als USV fungieren. In weiteren Schritten soll untersucht werden, wie sich der Einfluss der Koppeldrossel aus der Piller-USV umsetzen lässt, sowie eine Rekombination auf das Netz nach Beheben des Fehlers.

**Prüfstand:** Auf dem ehemaligen Kompensationsstromrichter aus dem CUTEK-Energiepark wird aktuell das abc-VISMA-Modell betrieben. Mithilfe eines Batteriespeichers kann die VISMA im Vierquadranten-Betrieb gefahren werden. Als nächster Schritt werden die Komponenten zum Erzeugen des Kurzschlusses sowie Netztrennung in Betrieb genommen. Anschließend soll das Verhalten der VISMA bei einem Kurzschluss untersucht werden, zunächst ohne Netzkopplung.

**Projektstand:** Das Projekt ist in Bearbeitung

**Quellen:** [1] <http://www.piller.com/de-DE/documents/516/ubt-rotary-ups-brochure-de.pdf>

**Bearbeiter:** Dipl.-Ing. Anja Ufkes (Tel: 72-2594)  
anja.ufkes@tu-clausthal.de

**Projektleiter:** Dr.-Ing. Dirk Turschner (Tel: 72-2592)  
turschner@iee.tu-clausthal.de



**Projekt:** Entwicklung eines innovativen Umrichtersystems mit Speicher mit Eigenbedarfsoptimierung und Netzstabilisierung

---

**Problem:** Die zuverlässige Funktion von elektrischen Netzen erfordert nicht nur die Einspeisung ausreichender Energiemengen, sondern auch die Erbringung einer Reihe von Systemdienstleistungen. Zu den Systemdienstleistungen gehören u.a. die Aufgaben wie Spannungshaltung, Frequenzhaltung, Vorhaltung von Blindleistung, Bereitstellung von Momentanreserve und die Möglichkeit nach einem Stromausfall den Versorgungswiederaufbau zu gewährleisten. Einige dieser Aufgaben liegen im Verantwortungsbereich des Netzbetreibers, andere erfordern einen umfangreichen Datenaustausch zwischen den unterschiedlichen Netzbetreibern, den Kraftwerksbetreibern und zukünftig verstärkt mit den Verbrauchern. Für die Bereitstellung von Momentanreserve sind derzeit ausschließlich die zentralen Großkraftwerke verantwortlich. Sie liefern damit einen wesentlichen Beitrag zur Stabilisierung des elektrischen Netzes. Durch den zunehmenden Ausbau der erneuerbaren Energien muss diese Aufgabe zukünftig über die Definition entsprechender Anschlussregeln und/oder durch Vergütung der erbrachten Systemdienstleistungen durch den dezentralen Einspeisern erbracht werden. Alle netzstabilisierenden Eigenschaften können von der Virtuellen Synchronmaschine (VISMA) in Kombination mit einem regenerativen Erzeuger, z. B. einer PV-Anlage und/oder einem geeigneten Speichersystem bereitgestellt werden (TU Clausthal-Patent-Nr. EP2070174 B1; USA: US 2010/0256970 A1; Japan: P2010541516A).

**Ziel:** Die Firma Power Innovation Stromversorgungstechnik GmbH wird im Rahmen des Projektes zusammen mit dem Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme der TU Clausthal einen Umrichter mit VISMA-Eigenschaften entwickeln, um dem Markt ein diesbezügliches Produkt zur Verfügung zu stellen.

**Lösungsweg:** Ein gravierender Nachteil marktüblicher Umrichter und des erprobten VISMA-Umrichtersystems ist der fehlende Neutraleiter. Sie bilden nur Dreileiternetze und nicht Vierleiternetze nach. Im übrigen verursacht der im VISMA-Umrichter verwendete Phasenstromregler durch die hohe Schaltfrequenz der Leistungshalbleiter erhöhte Verluste und ein breites Oberschwingungsspektrum im Netz.

Mit Hilfe der neuen Umrichtertopologie für ein Vierleiternetz (L1, L2, L3, N) mit vier Brücken zweigen werden diese Nachteile zukünftig umgangen. Abbildung 2 zeigt den Aufbau dieser neuen Topologie. Herkömmliche Umrichter verfügen über drei Brücken zweige (Abbildung 1). Bei dem neuen Konzept wird über eine Raumzeigermodulation die verlustbehaftete Hysterese-regelung vermieden. Durch das Hinzufügen einer weiteren Dimension wird aus dem zweidimensionalen Raumzeiger ein Hyperzeiger, der im dreidimensionalen Raum rotiert. Unsymmetrien können damit zukünftig bei konstanter Schaltfrequenz wirksam kompensiert werden, die darüber hinaus zur Verlustreduzierung im angeschlossenen Netz führen und somit die Effizienz der Energieverteilung steigern.

---

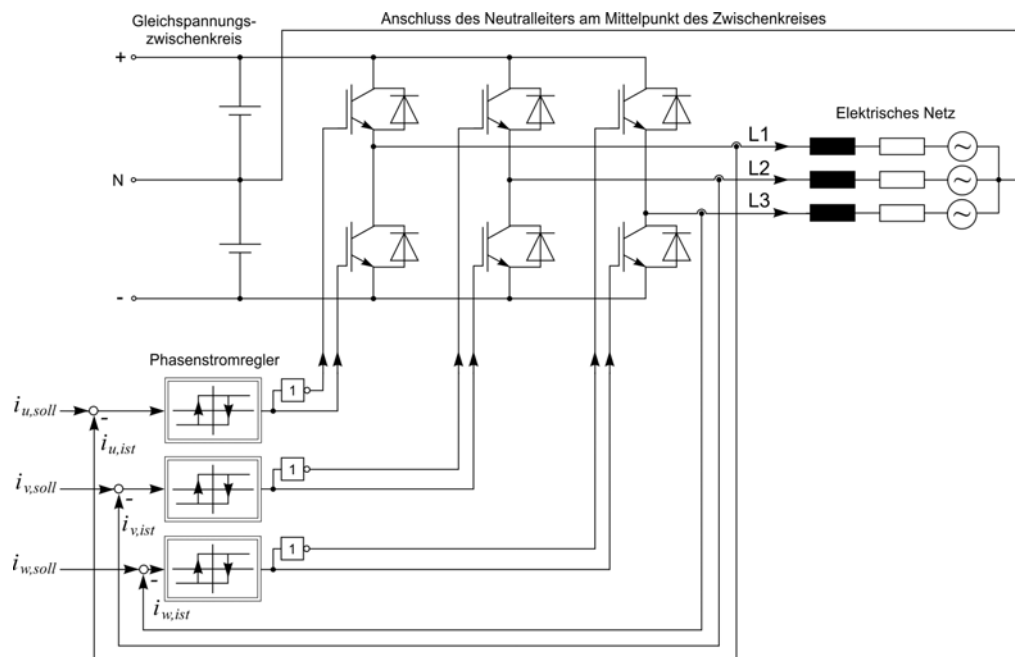


Abbildung 1: Bisher verwendete VISMA-Umrichtertopologie mit Phasenstromreglern und einer Mittelanzapfung im Gleichspannungszwischenkreis

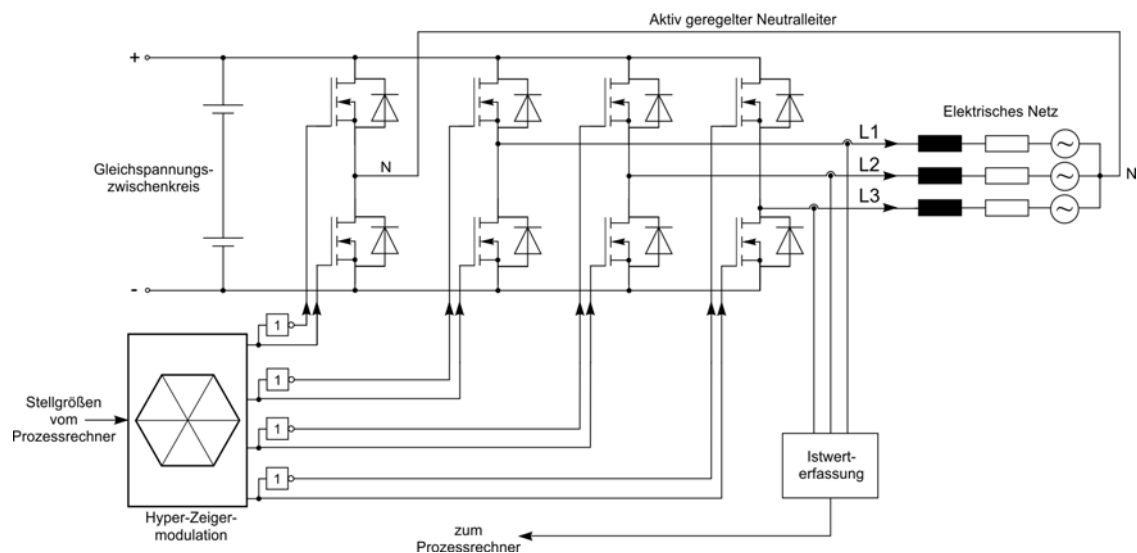


Abbildung 2: Die neue VISMA-Umrichtertopologie verzichtet auf eine Mittelanzapfung im Zwischenkreis und ersetzt diese durch einen vierten aktiv geschalteten Brücken-zweig für den Neutralleiter, um zukünftig die VISMA-Funktion bei konstanter Schaltfrequenz anzubieten und zusätzlich Unsymmetrie im Niederspannungsnetz kompensieren zu können.



**Projekt:** Entwicklung eines innovativen Umrichtersystems mit Speicher mit Eigenbedarfsoptimierung und Netzstabilisierung

---

**Projektstand:** Die Planungs- und Konzeptphase ist abgeschlossen.

Für die Implementierung des neuen Steuerverfahrens für den 4-Leiter Umrichter sowie für die Realisierung der VISMA-Funktionen ist ein geeigneter Controller ausgewählt worden.

Power Innovation erarbeitete ein Konzept für die leistungselektronische Endstufe des Umrichters. Als Ausgangsbasis dienten die vom Unternehmen entwickelten mehrphasigen DC/DC-Wandler mit der verwendeten Silizium-Carbid Technologie. Parallel zur Umrichterentwicklung erfolgt der Aufbau einer geeigneten Testumgebung in der Experimentalhalle des Instituts.

### **Statistische Daten**

#### **Vorhabenbe-**

**zeichnung:** Entwicklung eines innovativen Umrichtersystems mit Speicher zur Eigenbedarfsoptimierung und Netzstabilisierung (Arbeitstitel: Solar-Visma)

**Fördernde Stelle:** Nbank - Mittel des Landes Niedersachsen

**Förderkennzeichen:** 85012826

#### **Laufzeit des**

**Vorhabens:** 01.01.2017 – 31.12.2018

#### **Verantwortlicher**

**Projektleiter:** Bernhard Böden  
(Power Innovation Stromversorgungstechnik GmbH)  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck (IEE)

**Bearbeiter:** Dipl.-Ing. Benjamin Schwake  
(Power Innovation Stromversorgungstechnik GmbH)  
Christoph Klaas, B. Sc (Tel: 72-3736)  
christoph.klaas@tu-clausthal.de

**Projektleiter:** Dr.-Ing. Dirk Turschner (Tel: 72-2592)  
turschner@iee.tu-clausthal.de



## **Projektübersicht**

---

Projektleiter: Dr.-Ing. Ralf Benger  
Tel.: +49-5321/3816-8067  
E-Mail: ralf.benger@efzn.de

### **Arbeitsgruppe Elektrische Energiespeichersysteme**

#### **Forschungsschwerpunkte und Projekte**

Die letzten zwei Jahre in der Arbeitsgruppe Energiespeichersysteme waren neben den wissenschaftlichen Arbeiten in den Projekten geprägt durch die erfolgreiche Beantragung zweier großer Verbundprojekte, dem weiteren Auf- und Ausbau des Batterietestzentrums am EFZN in Goslar und dem personellen Übergang in der Gruppenleitung von Prof. Wenzl auf Dr. Benger. Prof. Wenzl hat über mehrere Jahrzehnte die Batteriesystemforschung an der Clausthaler Universität etabliert und forciert und mit seiner systemischen Denkweise die Voraussetzungen für eine erfolgreiche Fortführung der Forschungen im Bereich der Energiespeichersysteme geschaffen. Auch in Zukunft gilt sicher, dass “jede neue Entladung eine neue Überraschung” mit sich bringt.

Im Fokus der Arbeitsgruppe “Energiespeichersysteme” steht die möglichst ganzheitliche Betrachtung von Einsatzmöglichkeiten von Energiespeichersystemen in stationären und mobilen Anwendungen. Dabei gilt es, unter systemischen Gesichtspunkten Speicher für elektrische Energie auf unterschiedlichsten Zeit- und Größenskalen für die jeweiligen Anwendungsszenarien zu selektieren und zu optimieren bzw. so zu betreiben, dass ein Optimum hinsichtlich Wirtschaftlichkeit, Effektivität und Stabilität des elektrischen Energieversorgungssystems erreicht werden kann. Bei dem zu versorgenden System kann es sich dabei um ein kleines mobiles Gerät, eine elektrische Antriebseinheit oder ein Bordnetz in einem Fahrzeug oder ein elektrisches Netz handeln.

Insgesamt reicht das Spektrum der zu betrachteten Speicher von relativ kleinen leistungsstarken dezentralen Speichern im Zeitbereich weniger Sekunden zur dynamischen Netzstabilisierung und Energieinhalten von einigen Kilowattstunden bis mittelgroßen Speichern mit Energieinhalten im Megawattstundenbereich. Die Technologiespannbreite umfasst dabei reine elektrische Speicher wie Doppelschichtkondensatoren und supraleitende Spulen, mechanische Speichersysteme wie Schwungmassenspeicher sowie elektrochemische Speicher und Energiewandler wie Batterien und Brennstoffzellen-/Elektrolyseeinheiten.

## **Batteriezuverlässigkeit und -sicherheit**

Mit immer größer werdenden spezifischen Energie- und Leistungsdichten beherbergen insbesondere elektrochemische Speicher auch ein wachsendes (latentes) Gefahrenpotential. Die Einführung neuer Materialkombinationen und immer größer werdende Anforderungen an die Speichersysteme bei gleichzeitigem Kostendruck erfordern daher sowohl für mobile als auch stationäre Anwendungen Forschungsarbeiten zur sicheren Anwendung von Batterien auf Zell-, Modul- und Systemebene. Dementsprechend sind ausgehend von kleinen Halbzellen bis hin zu großen Batteriesystemen die elektrochemischen, elektrophysikalischen und thermodynamischen Vorgänge zu erkennen, zu verstehen und spezifische Handhabungsregeln zu erstellen. Hierfür ist aufgrund der Komplexität elektrochemischer Speicher eine besondere, systemübergreifende Bündelung von Kompetenzen aus der Elektrotechnik, der elektrochemischen Verfahrenstechnik, der Sensorik und der Energiesystemtechnik notwendig sowie die erforderliche Forschungsinfrastruktur vorzuhalten.

In diesem Zusammenhang werden folgende wissenschaftlichen Themen bearbeitet:

- Entwicklung und Validierung von Sicherheitskonzepten für Batterien
- Evaluation von Prüfverfahren hinsichtlich Funktionalität und Sicherheit
- Batteriezustandserkennung und Restwertermittlung z. B. für Second Life Anwendungen
- Methoden zur Anwendung von Zuverlässigkeits- und Verfügbarkeitskennzahlen für elektrische Energiespeichersysteme
- Risikoabschätzung und -management
- Batteriealterung

Die Fragestellungen und wissenschaftlichen Themen werden in folgenden Projekten untersucht:

- Untersuchung des Brandverhalten von Lithium-Ionen-Batterien und Überprüfung der Löschwirkung von verschiedenen Löschmitteln für Lithium-Ionen-Brände
- Abuse-Tests auf Zell- und Modulebene wie z. B. thermische Ausbreitung in einem Batteriemodul, thermische Stabilität, Überlade- und Überentladeverhalten
- Kurzschluss test auf Zell-, Modul- und Systemebene zur Überprüfung externer und interner Überwachungs- und Abschaltorgane sowie des thermischen Verhaltens
- Leistungstests von Hochleistung-Energiespeichern im Bereich 600 - 900 V und 1200 A, 600 kW

### **● Dynamisches Verhalten leistungsstarker Kurzzeit-Energiespeichersysteme**

Bei der Betrachtung des Strom-Spannungsverhaltens und des thermischen Verhaltens im Kurzzeitbereich und deren Auswirkungen beispielsweise auf das Langzeitverhalten zeigen sich

---

## Projektübersicht

---

Effekte, die ohne eine erweiterte Modellvorstellung nicht erklärbar sind. Nur durch die systemische Betrachtung über den “Tellerrand” hinweg lässt sich ein Energiespeichersystem für die jeweilige Anwendung optimal dimensionieren, betreiben und nachbilden.

Auch hier spielt die systemische Betrachtung der jeweiligen Energiespeichertechnologie in der entsprechenden Umgebung eine wesentliche Rolle, da immer Wechselwirkungen zwischen den einzelnen technischen Systemen bestehen. Dies betrifft zum Beispiel die gegenseitige Rückwirkung des Verhaltens eines Batteriespeichers über eine Leistungselektronik auf das Netz und umgekehrt.

Aus wissenschaftlicher Sicht ist daher insbesondere die Weiterentwicklung von Batteriemodellen für den hochdynamischen Einsatz und die Auswirkungen großer Leistungsgradienten auf das elektrische und thermische Verhalten allgemein und auf die Lebensdauer von Batterien im Speziellen von großem Interesse.

Im Rahmen der Betrachtungen wird folgenden Fragestellungen mit dem Ziel, allgemein gültige Auslegungsverfahren für die optimierte Betriebsführung und Zustandsdiagnose von elektrischen (Kurzzeit-) Speichersystemen bei elektrisch dynamischen Grenzbelastungen unter Berücksichtigung der jeweiligen Wechselwirkungen (z. B. Umrichter, Antriebs- und Versorgungsnetze) zu erhalten, nachgegangen:

- dynamisches Batterieverhalten bei Misch- und Wechselstrombelastungen
    - Auswirkungen pulsformiger Belastungen auf elektrochemische Speicher (z. B. Lithium-Plating bei Schnellladungen), Batteriealterung
    - Bestimmung der Stromdichteverteilung / Feldberechnung bei transienten Belastungen in elektrochemischen Systemen
    - Maßnahmen zur Verbesserung der Stromdichteverteilung in elektrochemischen Systemen
  - Entwicklung von schonenden und sicheren Schnellladeverfahren
  - Nicht-invasive Identifikation des Alterungszustands und von Schädigungen
  - Alterungsmodelle (physikalisch / chemisch, ereignisbasiert)
  - Betrachtungen der Skalierbarkeit von der Zelle zum System auf verschiedenen Zeit-, Energie- und Leistungsskalen
  - Wechselwirkungen zwischen Energiespeicher und Anwendungen (z. B. Netz-Wechselrichter-Batteriespeicher)
  - Aktive Filterung von Leistungsfluktuationen durch Multiskalen-Energiespeichersysteme
  - Vergleich / Bewertung konkurrierender Energiespeichersysteme
-

Ein Spektrum der genannten Themen wird bereits im Rahmen von zwei vom BMWi geförderten Verbundprojekten mit mehreren Forschungs- und Industriepartnern bearbeitet. Im Projekt “Modulare Hochleistungsbatteriesysteme in Verbindung mit sicherer Schnellladetechnik - MoBat” werden neuartige Schnellladealgorithmen für Hochleistungsbatterien identifiziert und hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf das prognostizierte Alterungsverhalten und damit auf die Lebensdauer von Batteriesystemen bewertet. Hierzu werden Ladeverfahren entwickelt, in verschiedensten Tests auf Zell-, Modul- und Systemebene angewendet und anschließend bzgl. der Integration in das Gesamtsystem bestehend aus Batterie und Hochleistungsladeinfrastruktur evaluiert.

Wie ein Hochleistungsbatteriesystem für die Erbringung von Momentanreserve zur Netzstabilisierung auszulegen ist und wie sich die Belastungen aus den zu erbringenden Systemdienstleistungen auf das Batterieverhalten auswirken, wird im Projekt “Momentanreserve mit Hochleistungsbatterien - ReserveBat” untersucht. Hierbei werden insbesondere die Auswirkungen von dynamischen Belastungen und sogenannten Mikrozyklen im Subsekundenbereich auf die Alterung eines Lithium-Ionen-Batteriespeichers betrachtet sowie die Rückwirkungen auf das Gesamtsystemverhalten einschließlich der netzstabilisierenden Wirkung im Demonstratormaßstab untersucht.

Neben den genannten Projekten wurden auch zahlreiche studentische Abschlussarbeiten zu diesen Themenbereichen durchgeführt und studentische Hilfskräfte werden in die Projekte eingebunden.

**Projekt:** Simulation signifikanter Größen von Lithium-Ionen-Batterien auf Basis von Stoffdaten und ihren alterungsbedingten Veränderungen (GEENI)

---

**Problem:** Eine erfolgreiche Modellierung von Lithium-Ionen-Batterien muss alle physikalischen und elektrochemischen Vorgänge, wie beispielsweise die elektrochemischen Reaktionen an den Elektroden, die Diffusion und Migration von Ionen im Elektrolyten, den Transport elektrischer Ladungen und den Wärmetransport abbilden. Zusätzlich kann es zu Beeinflussungen der Eigenschaften durch Volumenänderungen und mechanischen Spannungen in den Elektroden kommen. Ein umfassendes Modell muss in der Lage sein, nicht nur die resultierende Zellspannung beim Laden und Entladen, sondern auch die sich in der Batterie einstellenden Temperaturverläufe und mechanischen Spannungen auf der Mikroebene abzubilden. Weiterhin muss ein solches Modell die alterungsbedingten Veränderungen der Materialeigenschaften berücksichtigen.

Lokale Stromdichten, Temperaturen und Potenziale innerhalb einer Batteriezelle werden von mehreren Faktoren beeinflusst. Bestimmende Parameter sind vor allem die Geometrie einer Zelle und die Materialeigenschaften. Weiterhin werden die Elektrodenmaterialien von Akkumulatoren in Abhängigkeit verschiedener Betriebsbedingungen (z.B. Umgebungstemperatur, Ladezustand, Höhe des Lade- und Entladestroms) unterschiedlich belastet.

**Ziel:** Ziel dieses Projektes ist eine genaue Bestimmung der lokalen Zustandsgrößen in Abhängigkeit der Zellkonstruktion und der Materialeigenschaften. Inhaltlich wird der Aufbau eines Modells zur Simulation auf der Elektroden- und Zellebene behandelt. Ergebnis ist ein orts aufgelöstes, mehrdimensionales Simulationsmodell zur Darstellung der lokalen Stromdichten sowie der Ladungs- und Spannungsverteilung innerhalb einer Vollzelle. Durch die Simulation sollen lokale Materialfehler (z.B. Verunreinigungen), wie sie bei der Produktion von Batterien entstehen können, und die Materialermüdung durch Betrieb der Zellen anhand der Ausgabegrößen erkannt werden.

**Stand der Technik:** Zur Modellierung von Lithium-Ionen-Batterien wurden diverse Modelle vorgestellt. Diese besitzen verschiedenste Ansätze und weisen unterschiedliche Eigenschaften auf. Beispielsweise existieren isotherme, dynamische 2D-Modelle, die den Ladungs- und Ionentransport sehr detailliert abbilden. Solche Modelle besitzen eine hohe Rechenzeit, die sich nur durch geeignete Vereinfachungen reduzieren lässt. Weiterhin gibt es Modelle, die zur tiefergehenden Betrachtung nur einzelne Bereiche einer Zelle betrachten oder unter Verwendung verschiedener Ersatzschaltbilder eine Modellierung auf Systemebene gestatten [1–6]. Ziel ist daher die Entwicklung eines orts aufgelösten, mehrdimensionalen Simulationsmodells, welches soweit abstrahiert wird, dass eine angemessene Rechenzeit bei notwendiger Genauigkeit erreicht und eine Skalierung von der Zelle über ein Modul bis zum Batteriesystem möglich wird.

**Lösungsweg:** Basis für die Modellierung des zu betrachtenden Systems ist ein elektrotechnisches Netzwerk, dem verschiedene Verfahren zur Analyse zu Grunde liegen. Beispielsweise werden Maschenströme, Knotenpotenziale und Ersatzquellen innerhalb der untersuchten Zelle ermittelt. Die Vorgehensweise wird in Simulationen auf unterschiedlichen Skalengrößen verwendet. Diese Betrachtung beginnt im Aufbau der Elektroden und endet auf Ebene der Zelle. Die Erstellung des Simulationsprogramms erfolgt mittels MATLAB/ Simulink.

**Projektstand:** Zur Schaffung einer geeigneten Datengrundlage für die Modellbildung und Simulation wurden in Absprache mit den verbundenen Forschungsinstituten verschiedene standardisierte Prüfverfahren und Messroutinen erarbeitet. Dies beinhaltet die Verwendung von einheitlichen Materialien und Herstellungsverfahren für die zu betrachtenden Lithium-Ionen-Batterien. Weiterhin wurde eine umfangreiche Datensammlung durch mehrere Forschungsstellen zusammengetragen. Durch eigene Messungen im Speicherlabor des IEE werden Daten, die als Grundlage für die Berechnungen dienen, ermittelt.

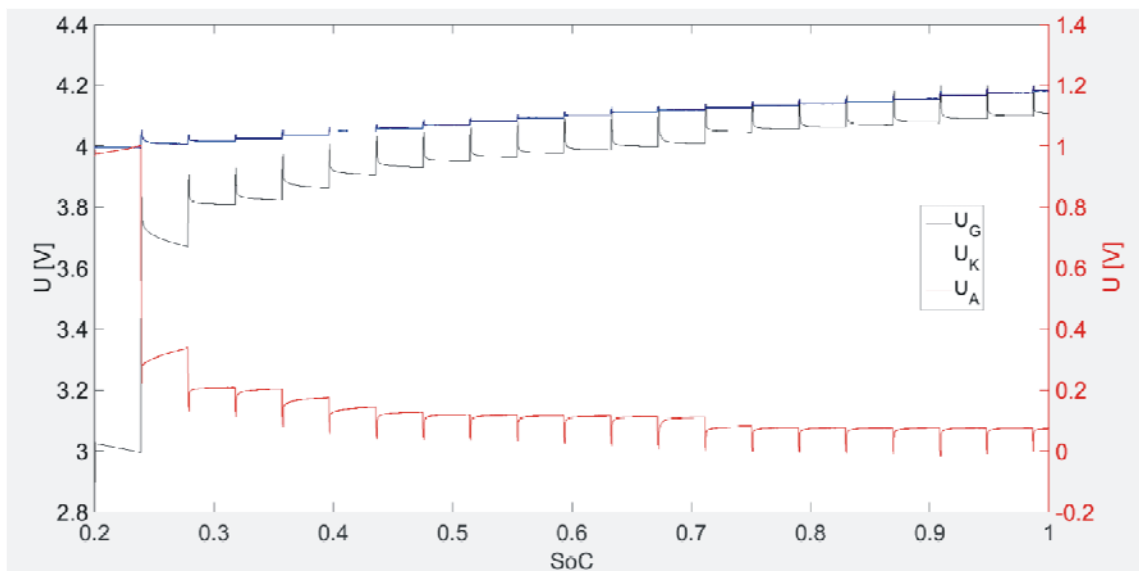


Abbildung 1: Messung der Spannung von Anode ( $U_A$ ), Kathode ( $U_K$ ) und der Gesamtspannung ( $U_G$ ) einer LMO-Zelle in Abhängigkeit des Ladezustands (SoC) bei einer Temperatur von 20°C und einer Stromrate von 1 C

Diese Messungen werden mit Hilfe einer 3-Elektrodenanordnung durchgeführt. Aus den Messergebnissen werden Funktionen abgeleitet, die zur Simulation im Modell hinterlegt werden. Weiterhin werden Daten aus Impedanzmessungen (vgl. Abb. 2) und Sprungantworten auf Strompulse gewonnen.



**Projekt:** Simulation signifikanter Größen von Lithium-Ionen-Batterien auf Basis von Stoffdaten und ihren alterungsbedingten Veränderungen (GEENI)

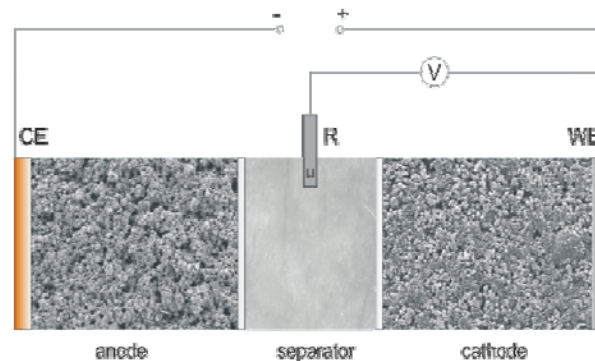


Abbildung 2: Messaufbau für die Messungen mit drei Elektroden WE (Arbeitselektrode), CE (Gegenelektrode), R (Referenzelektrode) zur Bestimmung der Halbzellenpotentiale und der Gesamtspannung (vgl. Abb. 1)

Die Topologie des verwendeten Ersatzschaltbildes ergibt sich aus dem allgemeinen Aufbau einer Lithium-Ionen-Batterie. Neben den Materialwiderständen der Elektroden werden weitere Elemente, wie die Quellspannungen von Anoden- und Kathodenreaktion sowie verschiedene RC-Glieder zur Berücksichtigung der dynamischen Prozesse verwendet. Der Parametersatz, in dem die Eigenschaften der einzelnen Ersatzschaltbildelemente in Abhängigkeit vom Ladezustand enthalten sind, kann mit einer Messung ermittelt werden, so dass eine langwierige Datenbeschaffung entfällt. Diese Messwerte werden automatisiert ausgewertet und als Datengrundlage für die Simulationen verwendet.

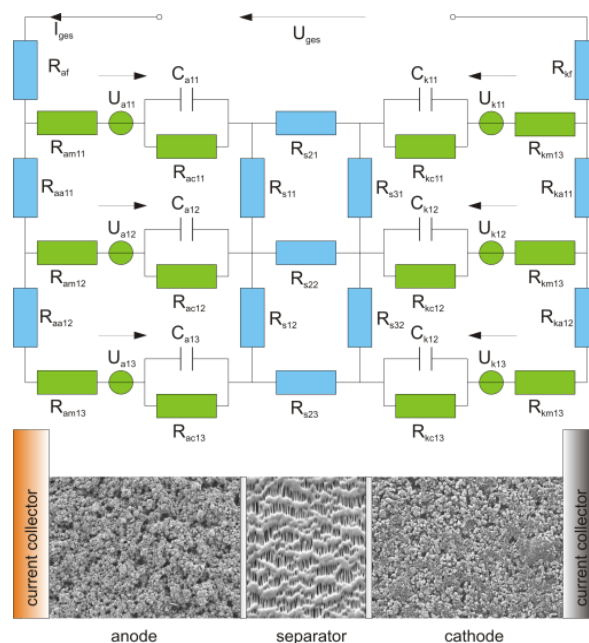


Abbildung 3: 2D-Darstellung des elektrischen Ersatzschaltbildes

Verschiedene Simulationen nach dem in Abbildung 3 dargestellten Ersatzschaltbild wurden erfolgreich durchgeführt. Abbildung 4 zeigt beispielsweise die Verteilung der Stromdichte innerhalb einer Lithium-Manganoxyd-Zelle über die drei Strompfade, die quer durch die Zelle von der Anode zur Kathode verlaufen und somit eine Ebene innerhalb der Zelle darstellen (vgl. Abb. 3).

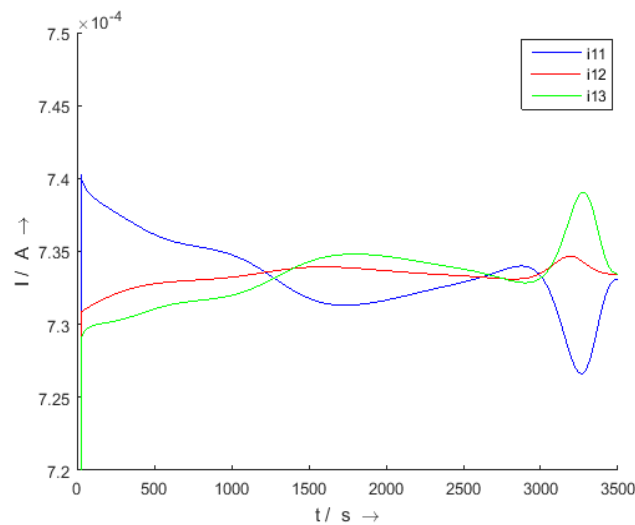


Abbildung 4: Ergebnisse für die Stromverteilung anodenseitig für eine 2D-Simulation nach Abb. 3 bei einer Stromrate von 1 C

Dieses Ersatzschaltbild, das sich zur Modellierung auf Zell- und Systemebene eignet, kann durch die Erhöhung der Anzahl der Knotenpunkte genauer aufgelöst werden. So sind in der nächsten Abbildung links die Strom- und rechts die Spannungsverteilung für eine Simulation mit sechs Ebenen dargestellt.

**Projekt:** Simulation signifikanter Größen von Lithium-Ionen-Batterien auf Basis von Stoffdaten und ihren alterungsbedingten Veränderungen (GEENI)

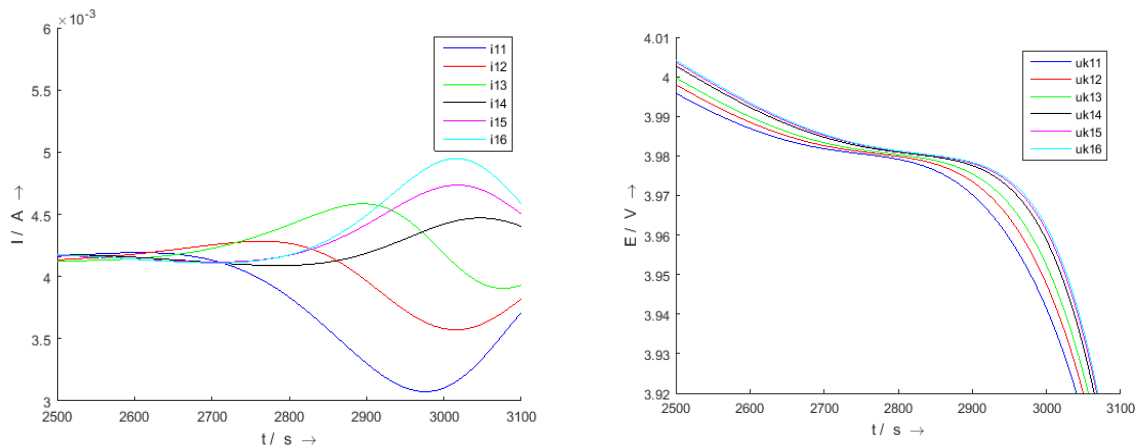


Abbildung 5: Ergebnisse (links Strom und rechts Spannung jeweils kathodenseitig) für die Stromverteilung einer Simulation mit sechs Strompfaden quer durch die Zelle bei einer Entladung mit einem Stromrate von 1 C

Weiterhin lassen sich die geometrischen Eigenschaften der Zelle verändern. Dies gilt für die Übertragung der Messergebnisse von der Labor- zu einer Pouch-Zelle mit demselben Material. Die auf Laborebene gemessenen Werte können unter Anpassung auf die Fläche der Pouch-Zelle zur Bestimmung des Eingangsparametersatzes verwendet werden. Außerdem können die Positionen der Klemmen der Zelle verändert und der Einfluss dieser Veränderungen simuliert werden.

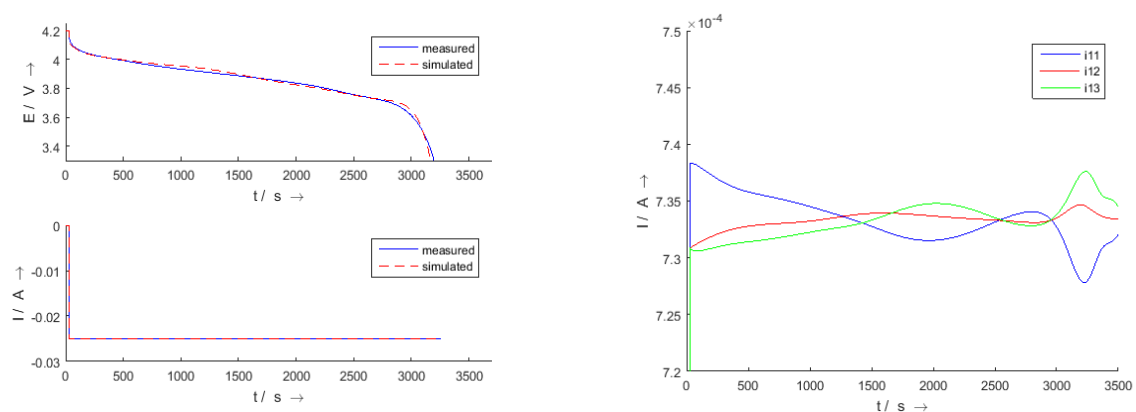


Abbildung 6: links: Gesamtspannungsverlauf für die Entladung mit einer 1 C-Rate für eine Simulation einer Pouch-Zelle, rechts: Stromverlauf bei einer Entladung mit 1 C nach Klemmenwechsel (Klemmen oben rechts anodenseitig unten links kathodenseitig, bgl. Auch Abb. 4 (beide Klemmen oben))

---

Somit ist innerhalb der Bearbeitungszeit ein Modell entstanden, das mit wenig Aufwand parametrisiert werden kann. Weiterhin können alle Parameter in Abhängigkeit von der Geometrie der Zelle sowie des verwendeten Materials berechnet und durch Messungen bestimmt werden. Alterungsveränderungen können ebenfalls mit Hilfe der aus Messungen gewonnenen Daten festgestellt werden und fließen so in das Modell ein.

**Literatur-  
verzeichnis:**

- [1] Doyle, M. (1993) Modeling of Galvanostatic Charge and Discharge of the Lithium/Polymer/Insertion Cell. *J. Electrochem. Soc.*, **140** (6), 1526.
- [2] Thomas, K.E. and Newman, J. (2003) Thermal Modeling of Porous Insertion Electrodes. *J. Electrochem. Soc.*, **150** (2), A176.
- [3] Shepherd, C.M. (1965) Design of Primary and Secondary Cells. *J. Electrochem. Soc.*, **112** (7), 657.
- [4] Newman, J. and Tiedemann, W. (1975) Porous-electrode theory with battery applications. *AIChE Journal*, **21** (1), 25–41.
- [5] Ecker, M., Kabitz, S., Laresgoiti, I., Sauer, D.U. (2015) Parameterization of a Physico-Chemical Model of a Lithium-Ion Battery: II. Model Validation. *Journal of the Electrochemical Society*, **162** (9), A1849-A1857.
- [6] Ramadesigan, V., Northrop, P.W.C., De, S., Santhanagopalan, S., Braatz, R.D., Subramanian, V.R. (2012) Modeling and Simulation of Lithium-Ion Batteries from a Systems Engineering Perspective. *Journal of the Electrochemical Society*, **159** (3), R31-R45.

**Forschungspartner :**

Verschiedene Institut der

- Technischen Universität Braunschweig
- Georg-August-Universität Göttingen
- Leibniz Universität Hannover
- Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
- Westfälische Wilhelms-Universität Münster
- Hochschule für angewandte Wissenschaften und Kunst Göttingen

**Bearbeiter:**

Dipl.-Ing. Alexander Oberland (Tel: 72-2938)  
alexander.oberland@tu-clausthal.de

**Projektleiter:**

Prof. Dr. rer. nat Heinz Wenzl

**Projekt:** Batterietestzentrum

**Ansatz:** Mit dem Batterietestzentrum am EnergieCampus in Goslar ist eine Versuchsinfrastruktur zum Prüfen von Batterien und anderen Hochleistungskomponenten unter Grenzbedingungen eingerichtet worden. Das im Wesentlichen von den Kooperationspartnern TU Clausthal und Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut gemeinsam verfolgte Ziel ist, in Zeiten stetig wachsender Herausforderungen an Batteriesysteme, den Blick nach vorne zu richten und zukunftsweisende und innovative technische Lösungen zu entwickeln. Insbesondere Hochleistungsbatterien, die unter extremen Belastungen stehen, müssen sicher sein und dürfen keine unkontrollierten Wirkungen erzeugen. Ziel ist es daher, über gemeinsame Forschungsprojekte von Wissenschaft und Wirtschaft Sicherheitskonzepte für Batterien zu entwickeln. Nur so wird es möglich sein, von zukunftsfähigen und für den Standort Deutschland wirtschaftlich bedeutsamen Technologien, wie bspw. der Elektromobilität, zu profitieren.



**Ziel:** Mit immer größer werdenden spezifischen Energie- und Leistungsdichten beherbergen Batterien bzw. Batteriesysteme auch ein wachsendes (latentes) Gefahrenpotential. Es gilt daher für immer größer werdende Anforderungen sowohl für mobile als auch stationäre Anwendungen Forschungsarbeiten zur sicheren Anwendung von Batterien auf Zell-, Modul- und Systemebene durchzuführen. Dementsprechend sind ausgehend von kleinen Halbzellen bis hin zu großen Batteriesystemen die elektrochemischen, elektrophysikalischen und thermodynamischen Vorgänge zu erkennen, zu verstehen und spezifische Handhabungsregeln zu erstellen. Hierfür ist aufgrund der Komplexität elektrochemischer Speicher eine besondere, systemübergreifende Bündelung von Kompetenzen aus verschiedenen Disziplinen notwendig, um Sicherheitskonzepte zu prüfen und weiterzuentwickeln, Prüfscenarien zu erstellen sowie das Batterieverhalten in Grenzbereichen abschätzen zu können.

---

**Methodik:** Die Einrichtungen und Prüfstände des Batterietestzentrums erlauben sowohl thermische als auch elektrische Belastungstests, die auch eine Zerstörung der Prüflinge ermöglichen (sog. Abuse Tests).

Mit verschiedenen Forschungs- und Industriepartnern wurden daher Tests entwickelt und durchgeführt, die einerseits das Prüfen nach entsprechenden Automobilstandards ermöglichen, aber andererseits auch sicherheitsrelevante Prüfungen für stationäre Speichersysteme erlauben. Ferner wurde auch das Brandverhalten von Lithium-Ionen-Batterien untersucht, Messungen der auftretenden Rauch- und Brandgase durchgeführt und die Löschwirkung von verschiedenen Löschmitteln ermittelt.

### **Untersuchung der Löschwirkung verschiedener Löschmittel und des Brandverhaltens von Lithium-Ionen-Batterien:**

Lithium-Ionen-Batterien stellen heutzutage eine der bedeutendsten elektrochemischen Speichertechnologien im kommerziellen Bereich da. Sie werden in den unterschiedlichsten tragbaren Geräten, für Elektroautos, Heimspeichersysteme und viele weitere Anwendungen rund um die Uhr genutzt. Dabei sind diese vor allem wegen ihrer hohen Energiedichte von großer Bedeutung. Bei der alltäglichen Nutzung stellt jedoch die Frage, was bei einem Batteriebrand passiert und welche Anforderungen ein mögliches Löschmittel haben muss. Diese Fragestellung umtreibt die Hersteller von Löschmitteln, denn Batteriebrände sind nicht zu vergleichen mit herkömmlichen Hausbränden. Die Anforderungen sind vielseitig und bedürfen eines hohen Knowhows an Forschung und Entwicklung.



Gemeinsam mit der Firma FNL Neuruppin und den Forschern der TU Clausthal werden experimentelle Nachweise der Löschwirkung verschiedener Löschmittel bei Bränden von Lithium-Ionen-Batterien erbracht. Am Batterie-Sicherheitscampus Deutschland können neuartige Konzepte zur Vorbeugung von Batteriebränden entwickelt sowie die Wirksamkeit von Löschmitteln für unterschiedliche Speichertechnologien erforscht werden.

**Durchführung von Leistungstests und Sicherheitsmaßnahmen bei Hochleistungs-Lithium-Ionen-Batterien:** Im Rahmen der Überprüfung der Sicherheit von Batterien und Batteriesystemen werden im Batterietestzentrum Prüfungen nach verschiedenen Standards vorgenommen. Beispiele hierfür sind unterschiedliche Prüfungen aus den Regularien ECE R100, ECE R136 und UN T 38.3 sowie verschiedenen ICE-Normen. In solchen Vorschriften werden die thermischen, elektrischen und mechanischen Anforderungen an die jeweiligen Batteriesysteme definiert und Prüfabläufe für diese vorgeschrieben. Alle geforderten Prüfabläufe aus dem thermischen und elektrischen Bereich können im Batterietestzentrum realisiert werden. In der nachfolgenden Abbildung ist der Stromverlauf für einen Kurzschlussversuch nach ECE R100 dargestellt. Das Hochvolt-Batteriespeichersystem hat eine Nennspannung von 552 Volt und einen Energieinhalt von 88 kWh.

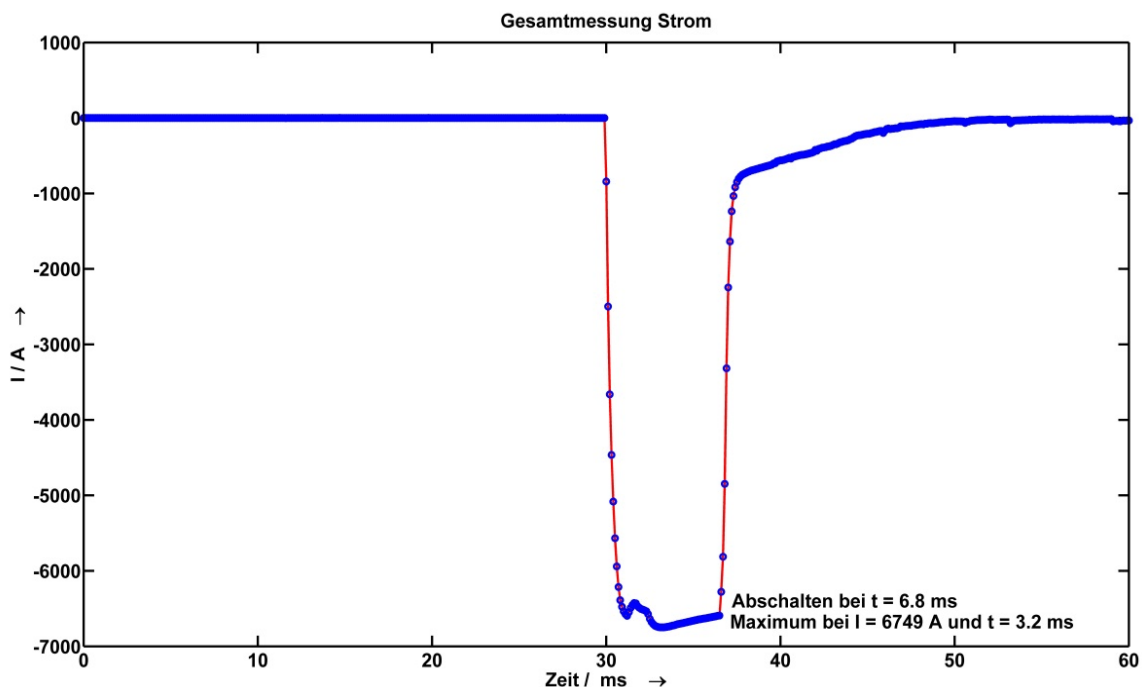


Abbildung 1: Stromverlauf beim Kurzschluss eines Batteriesystems



Leistungstests können bis zu einer Maximalleistung von 1,2 MW vorgenommen werden. So können Anforderungen, die sich aus einer bestimmten Anwendung ergeben, auf Systemebene überprüft werden. Weiterhin eignen sich die vorhandenen Prüfeinrichtungen zur Bestimmung von Ladefaktoren und Wirkungsgraden von Gesamtsystemen. Nachfolgend ist die Spannung für das obengenannte System in Abhängigkeit von kurzen Belastungen, die für einen Betrieb des Systems charakteristisch sind, abgebildet.

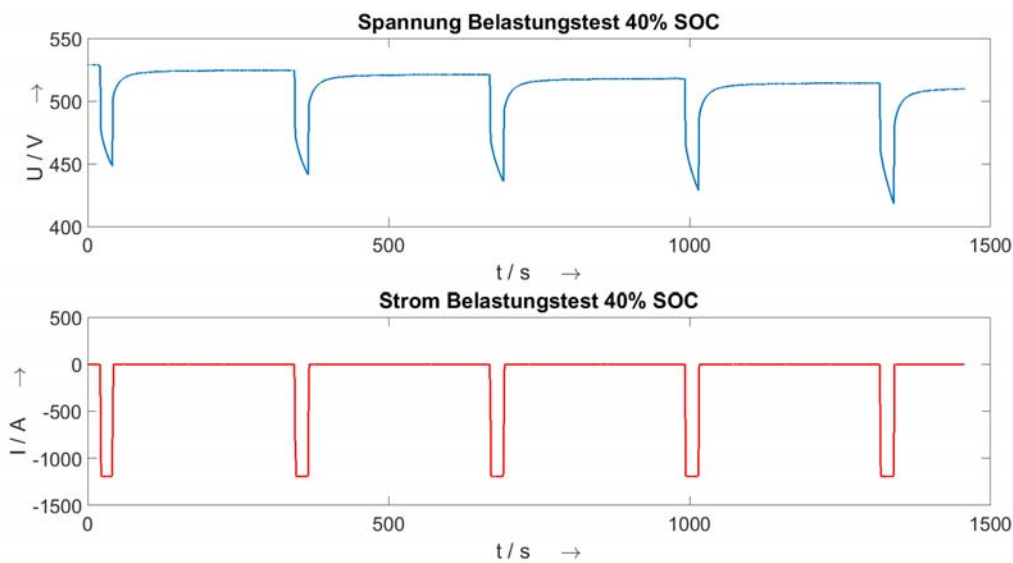


Abbildung 2: Spannungsverlauf in Abhängigkeit einer Pulsbelastung für ein stationäres Batteriesystem

**Abuse-Tests von Lithium-Ionen-Zellen:** Die zur Verfügung stehende Infrastruktur erlaubt es, durch vorhandene Brandöfen Batterien nicht nur bis zur Belastungsgrenze zu testen, sondern auch darüber hinaus. Neben der Simulation kritischer Situationen sind daher auch gezielte Abuse-Tests nach Norm möglich. Abbildung 3 veranschaulicht den Temperaturverlauf einer Batterie bei einem sogenannten Fuel-Fire-Test nach ECE R100. Hier wird simuliert, wie sich eine Lithium-Ionen-Fahrzeugbatterie bei einem Benzin-Feuer z.B. nach einem Unfall, verhält.



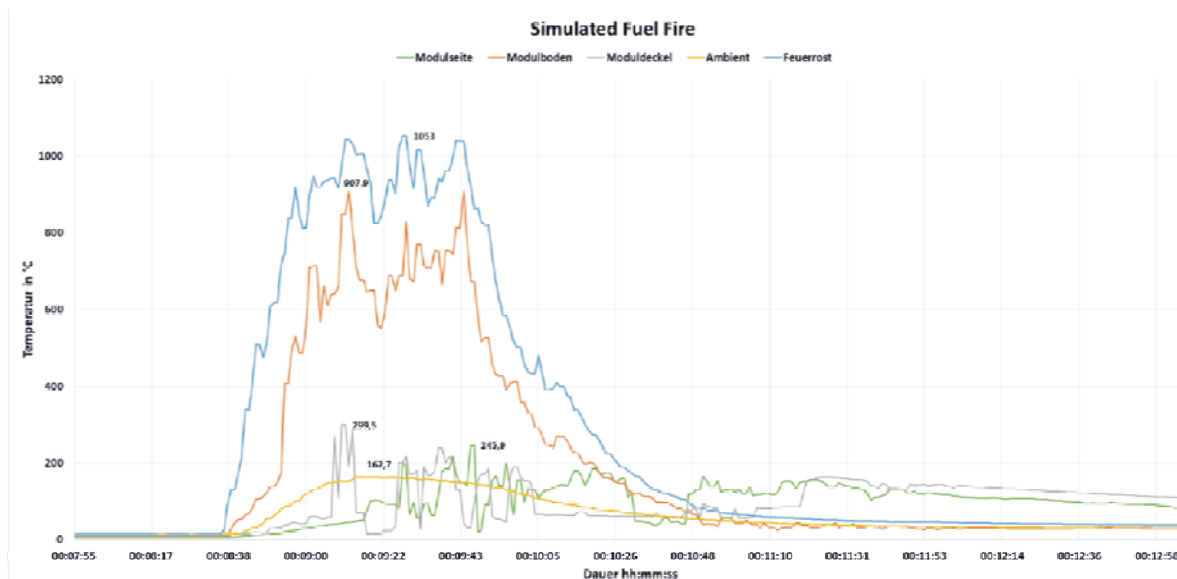
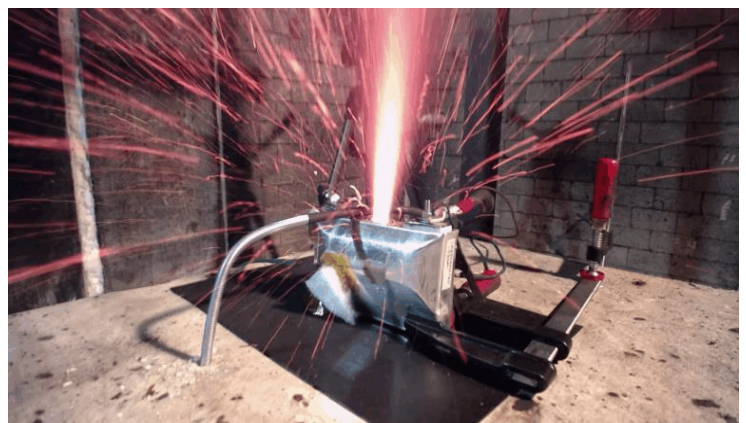


Abbildung 3: Temperaturverlauf eines Simulated Fuel Fire Test nach ECE R100 mit einem Batteriemodul. Direkt über dem Feuer betragen die Temperaturen mehr als 1000 °C und auch der Boden des Batteriemoduls erreicht fast 1000°C. Die sinkenden Temperaturen unmittelbar nach dem Brand belegen jedoch, dass es zu keinem thermischen Durchgehen des Moduls nach dem Feuer gekommen ist und der Test bestanden wurde.

#### Referenzen / durchgeführte Arbeiten:

- Überladen
- Überentladen
- Übertemperatur
- Kurzschluss (Zelle, Modul, System)
- Thermische Stabilität
- Brandausbreitungsprüfung
- Fuel Fire
- Temperaturverhalten
- Leistungstests mit 1200 A.
- Löschmittprüfung



---

|   |                                    |                        |
|---|------------------------------------|------------------------|
| <b>Forschungspartner :</b>                      | Verschiedene Industriepartner      |                        |
| <b>Bearbeiter:</b>                              | Lennart Beushausen, M. Sc.         | (Tel: 05321/3816-8065) |
|   | lbe10@tu-clausthal.de              |                        |
|   | Dipl.-Ing. Alexander Oberland      | (Tel: 72-2938)         |
|   | alexander.oberland@tu-clausthal.de |                        |
| <b>Projektkoordination/<br/>Techn. Leitung:</b> | Marcel Thiele, M. Sc.              | (Tel: 05321/3816-8161) |
|   | marcel.thiele@efzn.de              |                        |
|   | Dr.-Ing. Ralf Bengler              | (Tel: 05321/3816-8067) |
|   | bengler@iee.tu-clausthal.de        |                        |
| <b>Projektleiter:</b>                           | Prof. Dr.-Ing. H.-P. Beck          | (Tel: 72-2570)         |
|   | info@iee.tu-clausthal.de           |                        |

**Projekt:** ReserveBatt - Arbeitspaket: Ereignisbasiertes Alterungsmodell für Lithium-Ionen-Batterien für hochdynamische Belastungen

---

**Problem:** Für die Erbringung von Momentanreserve sind relativ hohe Leistungen bei gleichzeitig geringem Energieaufwand nötig. Dieses ist besonders mit Hochleistungsbatterien erreichbar. Dabei sind die Batterien mit individuellen Belastungen wie unterschiedlichen dynamischen Strombelastungen bei verschiedenen Ladezuständen und Temperaturen ausgesetzt. Diese wiederum haben einen starken Einfluss auf die Lebensdauer. Deshalb werden im Rahmen des Projektes Alterungsmodelle entwickelt, die auf Basis von Messdaten und Simulationsdaten das Batterieverhalten mit zunehmender Alterung und die Lebensdauer der Batterie vorhersagen können. Neben der Entwicklung eines physikalisch-chemischen Alterungsmodells sollen im Projekt Ansätze aus früheren Arbeiten (DFG Be 1496/17-1: Alterungsmodelle von Lithium-Ionen-Batterien) zur Entwicklung eines ereignisbasierten Modells weiterentwickelt und für die spezielle Anwendung adaptiert werden.

**Ziel:** Entwicklung eines Alterungsmodells als ereignisbasiertes Modell zur Beschreibung der Alterungseffekte von Lithium-Ionen-Batterien bei der Erbringung von Momentanreserve und die Entwicklung von validierten synthetischen Lastprofilen zur beschleunigten Durchführung von Alterungstests.

**Stand der Technik:** Die Entwicklung eines ereignisbasierten Lebensdauermodells für Lithium-Batterien ist nach Recherchen in der Literatur bisher nicht veröffentlicht und ist daher verstärkt voranzutreiben. Ansätze für den Einfluss der Reihenfolge von Belastungen auf die Batterie-lebensdauer und deren richtige Interpretation sind zum jetzigen Zeitpunkt kaum bekannt und werden einen weiteren Schwerpunkt in der fortlaufenden Modellentwicklung im Projekt bilden. Ansätze für Bleibatterien gehen v.a. auf die Arbeiten von Wenzl (Journal of Power Sources, 144(2005), 373-38) zurück und sind in Rahmen eines Projekts mit der Deutschen Bahn auch umgesetzt worden. Ereignisorientierte Modelle überzeugen durch hohe Rechengeschwindigkeit; die Genauigkeit ist wesentlich von der Parametrierung abhängig und erfolgt mit Hilfe durchgeführter Experimente und Expertenwissen.

**Lösungsweg:** Bei der Entwicklung eines ereignisbasierten Modells werden die lebensdauerrelevanten Belastungen (Strom, Stromänderungsgeschwindigkeit, Spannung Temperatur, Ladezustand) der Batterie im ersten Schritt nach Belastungsbereichen aufgeteilt (Abbildung 1). Dabei werden die Daten je nach gesuchten Ereignissen mit Hilfe von Zählverfahren (Rainflow-Zählung, Verweildauerzählung, Von-Bis-Zählung) in Matrizen (Belastungsmatrizen) klassifiziert. Danach werden die Wöhler-Matrizen und die Belastungsmatrizen zur Berechnung der Schädigung pro Bereich (Kapazitätsverlust, Lebensdauerverlust) verwendet. Jede Wöhler-Matrix enthält die Klassifizierung der bis zur Lebensdauerende aufgenommenen Belastungen eines Belastungsbereichs. Zudem werden die Wöhlermatrizen durch Experiment oder Literatur-

---

recherche ermittelt. Die Schädigungen aller Belastungsbereiche können zu einer Gesamtschädigung summiert werden.

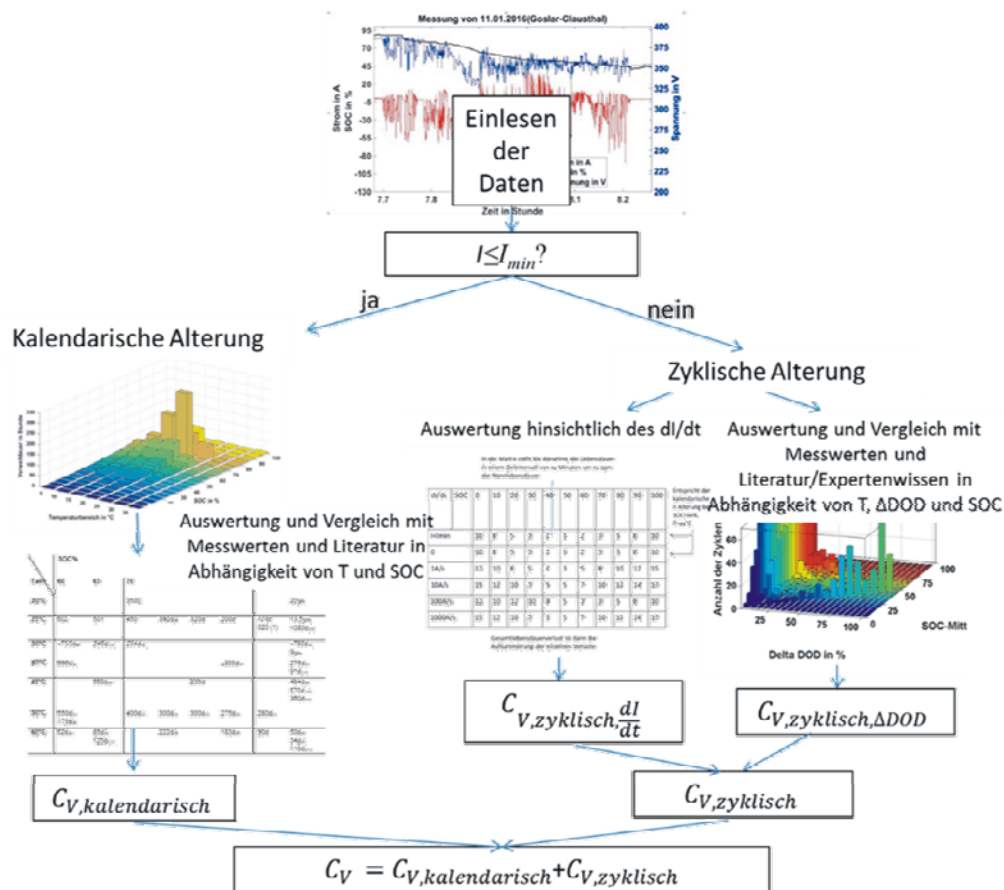


Abbildung 1: Bestimmung der Alterung mit dem ereignisbasierten Modell. Nach der Unterscheidung zwischen kalendarischer und zyklischer Alterung erfolgen die Bewertung der Schädigung auf Grund von Temperatur, Ladezustandshub, Ladezustand und Stromgradient mit Hilfe von Messwerten, Literatur- oder Herstellerangaben sowie Expertenwissen.

Die Belastungsbereiche hängen von den Betriebsbedingungen ab, die die Alterung der Batterie durch unterschiedliche Vorgänge hervorrufen. Dabei unterscheidet man zwei Hauptbelastungsbereiche. Der erste Belastungsbereich wird von der kalendarischen Alterung geprägt, während der zweite Belastungsbereich von der zyklischen Alterung geprägt ist.

**Projekt:** ReserveBatt - Arbeitspaket: Ereignisbasiertes Alterungsmodell für  
Lithium-Ionen-Batterien für hochdynamische Belastungen

---

Der Belastungsbereich mit kalendarischen Effekten enthält stromlose Phasen, bzw. Zeiträume in denen der Gleichstromanteil des Batteriestroms einen Wert kleiner als einen vorgegebenen Grenzwert hat, d.h.  $|I_{DC}| \leq I_{min}$  bei einem minimalen Zeitraum  $t_{min}$ . Dabei sind stromlose Phasen Belastungsbereiche mit einer Stromrate kleiner als 1/20 C. Dazu zählt man auch die Alterungseffekte, die durch langsame Ladezustandsänderungen die Batterie altert. Dabei soll die Ladezustandsänderung kleiner als 0,1 % pro Stunde sein.

Die Belastungsbereiche mit zyklischen Effekten sind alle Belastungsfälle, bei denen sich der Ladezustand um mehr als 0,1 % innerhalb einer Stunde ändert. Da die Alterung der Zelle durch eine Kombination  $f(T, C, SOC)$  aus Einflüssen von Temperaturen (T), Stromraten (C) und Ladezuständen (SOC) hervorgerufen wird, müssen einzelne Zustände aus der gesamten Belastung mittels Zählverfahren in Matrizen zusammengefasst werden. Unter der zyklischen Alterung unterscheidet man zwischen Effekten, die durch die Ladezustandsänderung verursacht werden und die durch schnelle Stromänderungen verursacht werden.

**Projektstand:** In Batterielabor des IEE laufen Experimente zur Validierung des ereignisbasierten Modells. Aufgrund der hohen Anzahl der Ladezustandsbereiche der Belastungsmatrizen, der langen Versuchslaufzeit und der begrenzt zur Verfügung stehenden Prüfkäle werden aus der Belastungsmatrix Bereiche ausgewählt. Zudem werden für ausgewählte Bereiche neue Zellen (Abbildung 2) bis zu 70 % Restkapazität bei 30° C mit jeweils 2 Stromrate (1C und 2C) belastet. Zusätzlich werden Zellen mit Belastungsprofilen aus der Durchmischung der ausgewählten Ladezustandsänderung-Bereichen und der Stromrate zur Untersuchung der dynamischen Effekten belastet.

Die Anzahl der Zyklen zwischen Ladezustandsbereichen (Abbildung 3) lassen sich durch einen Faktor in Anzahl von Vollzyklen umrechnen. Damit werden nach dem Prinzip der Markov-Kette die Belastungsprofile (Abbildung 4) generiert. Die Zellen werden dann mit den generierten synthetischen Profilen belastet. Somit lassen sich später die Kapazitätsverluste der Zellen mit dem aus der Belastungsmatrix zur Validierung des ereignisbasierten Modells vergleichen.

Der Einfluss der Belastungsreihenfolgen wird mit den oben ausgewählten Ladezustandsbereichen geprüft. Dabei werden Zellen mit abnehmenden bzw. zunehmenden Ladezustandsänderungsprofil belastet und die Verläufe von Kapazitätsverlust und der Innenwiderstandsänderungen verglichen.

Zur Analyse der Daten wird mit Matlab ein Tool entwickelt und die Messdaten in einer Datenbank archiviert. Zusätzlich können Kapazitätsverlust und Widerstandänderung der Zellen ermittelt werden.

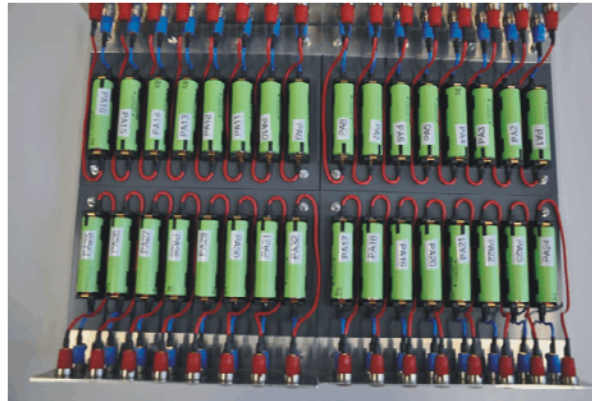


Abbildung 2: Aufbau der Zellen (NMC 18650er von Panasonic) zur Untersuchung der Alterung

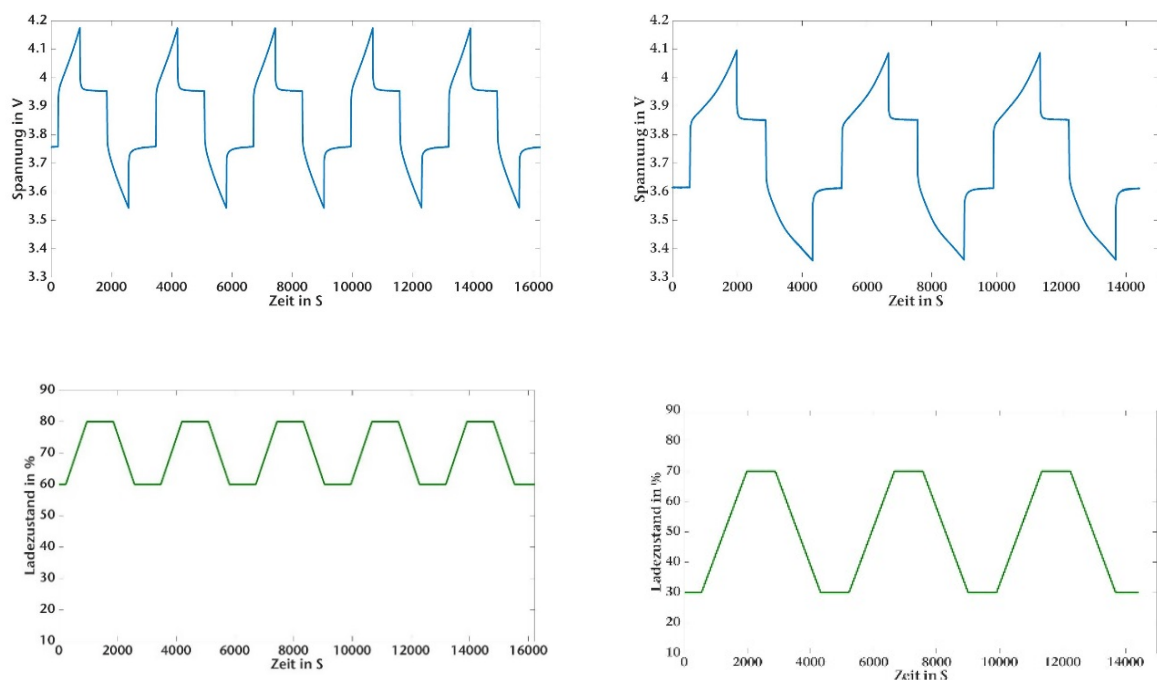


Abbildung 3: Ausschnitt von Verläufen (Spannung und Ladezustand) von einem äquivalenten Vollzyklus den NMC 18650er Zelle von Panasonic  
links: Zyklen von 60 % bis 80 % Ladezustand  
rechts: Zyklen von 30 % bis 70 % Ladezustand.  
Aufgenommen bei 30°C. Die Zellen sind mit einem konstanten Strom von 1 C belastet

**Projekt:** ReserveBatt - Arbeitspaket: Ereignisbasiertes Alterungsmodell für Lithium-Ionen-Batterien für hochdynamische Belastungen

---

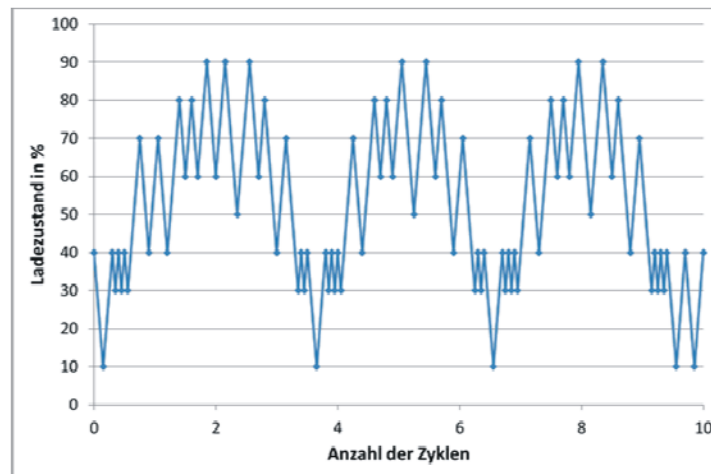


Abbildung 4: Ausschnitt eines generierten Profil aus mehreren Ladezuständen nach den Markov-Ketten-Prinzip

**Bearbeiter:** Dipl.-Ing. Eric Tchoupou Lando (Tel:72-3819)  
etl@tu-clausthal.de

**Projektkoordination:** Dr.-Ing. R. Benger (Tel:05321/3816-8067)  
benger@iee.tu-clausthal.de

**Projektleiter:** Prof. Dr.-Ing. H.-P. Beck (Tel: 72-2570)  
info@iee.tu-clausthal.de





**Projekt:** Systemdienstleistungen für den sicheren Betrieb des Energieversorgungssystems: Momentanreserve mit Hochleistungsbatterien - ReserveBatt -

**Problem:** Die Energiewende stellt die Versorgungssicherheit im Stromversorgungsnetz vor neue Herausforderungen und fordert innovative Lösungsansätze. Wie bei zunehmender Nutzung erneuerbarer Energien und der damit verbundenen Ablösung konventioneller Großkraftwerke die Netzstabilität erhalten werden kann soll in dem Projekt "ReserveBatt" untersucht werden. Hierzu soll ein leistungsstarkes und intelligentes Batteriesystem zu jedem Zeitpunkt ein Gleichgewicht zwischen fluktuierender Energieerzeugung und -verbrauch gewährleisten.

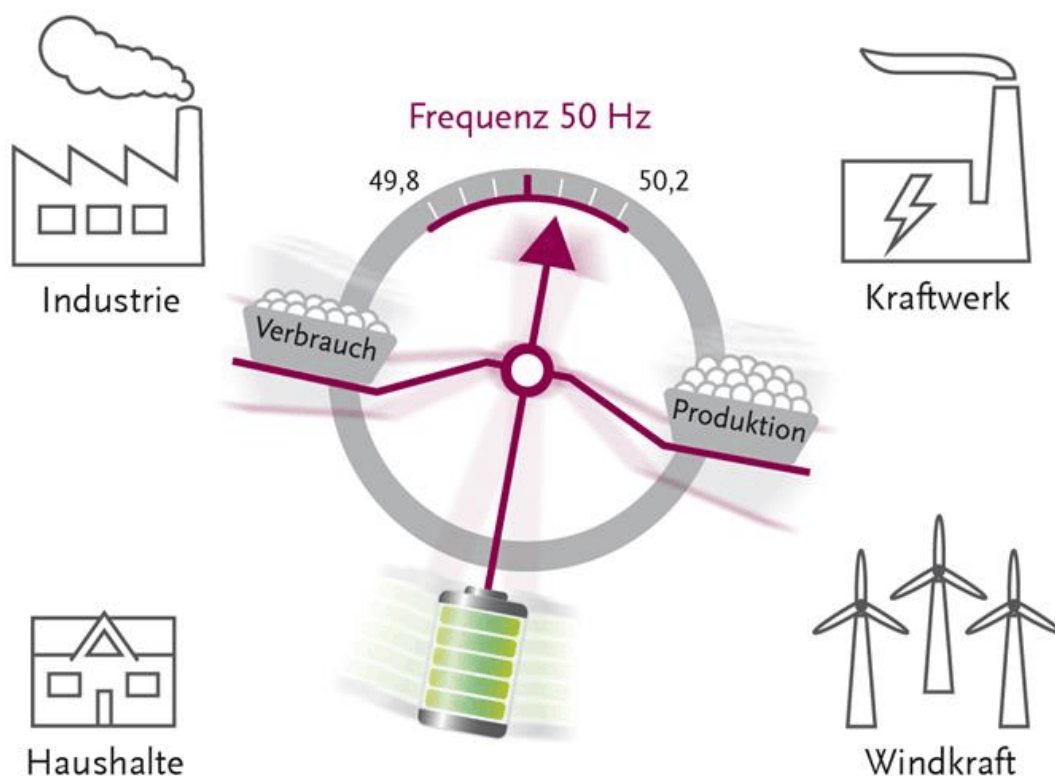


Abbildung 1: Darstellung des Gleichgewichts im elektrischen Energieversorgungssystem zwischen fluktuierender Erzeugung und Verbrauch

**Ziel:** Die Ziele des Gesamtprojekts sind die Konzeption und der Aufbau eines Demonstrators zur Erbringung von Momentanreserve als Systemdienstleistung für Betreiber von Energieversorgungsnetzen sowie die Erforschung seines Verhaltens in der Praxis und dessen Bewertung in Bezug auf den vorgesehenen späteren Einsatzbereich. Abgerundet wird das Projekt durch den Entwurf und die Evaluierung von Verwertungsmöglichkeiten und möglichen Geschäftsmodellen für die Erbringung von Systemdienstleistungen. Der Demonstrator enthält als

---

Kernkomponente einen sogenannten Stack-Wechselrichter, der im Rahmen des Projekts konzipiert und aufgebaut werden soll. Der Stack-Wechselrichter koppelt eine Lithium-Ionen-Hochleistungsbatterie mit dem Versorgungsnetz und steuert den Energiefluss zwischen beiden Systemen. Der Demonstrator soll im Leistungsbereich von 400 kW mit einem Batteriespeicher bei einem Energieinhalt von etwa 50 kWh ausgelegt werden. Der Feldtestbetrieb soll sich über mehrere Monate erstrecken, um eine aussagekräftige praxisnahe Erforschung und Bewertung seines Verhaltens unter besonderer Beachtung des Sicherheitsaspektes sicherzustellen.

**Lösungsweg:** Für die und Konzeption, den Aufbau und die anschließende Untersuchung der Komponenten sowie des Gesamtsystems zur Erbringung der Momentanreserve aus einem Hochleistungs-Batteriespeicher werden folgende Schritte am EFZ durchgeführt:

- Optimierte Auslegung eines Batteriespeichers hinsichtlich Leistungsfähigkeit und Energieinhalt unter Beachtung und Konzeption von Sensorik, Kühlung und Sicherheitsmaßnahmen sowie der Lebensdauer der Batterie
- Konzeption und Koordination des Aufbaus eines Leistungsspeichers bestehend aus Lithium-Batterie und Leistungselektronik zur Erbringung von Momentanreserve und anderen Systemdienstleistungen (ohne Primär- und Sekundärregelleistung sowie Minutenreserve) auf Niederspannungsebene als Labormuster und integrierte Gesamtlösung
- Berücksichtigung des Einflusses der Belastungen aus den Systemdienstleistungen (SDL) auf die Batterie insbesondere der Auswirkungen von dynamischen Belastungen und sog. Mikrozyklen im Subsekundenbereich auf die Alterung des Speichers, Rückwirkungen auf das Gesamtsystemverhalten einschließlich der netzstabilisierenden Wirkung
- Bewertung der Wirkung der SDL aus der Batterie über die Leistungselektronik auf das Netz und Entwicklung einer „Präqualifizierungsvorschrift“ zur Erbringung von Momentanreserve
- Betrachtung der Wirtschaftlichkeit und Kosten/Nutzen-Vergleich auch zu anderen Speichertechnologien oder alternativen Flexibilitätsoptionen zum Erbringen von SDL
- Entwicklung eines Business-Case in Abhängigkeit des aktuellen Marktgeschehens

**Projektstand:** Zum momentanen frühen Projektstand befinden sich die Partner in der Konzeptionsphase mit der Erstellung eines technischen Lastenheftes für die Komponenten und das Gesamtsystem. Insbesondere die Spezifikationen und Anforderungen an das Gesamtsystem sind frühzeitig für alle Projektpartner festzulegen, da auf Grund der großen Verzahnung und Abhängigkeiten der Teilprojekte untereinander Fehlentwicklungen zu vermeiden sind. Darüber hinaus verfolgen die Projektpartner parallele ihre individuellen Forschungsziele, die für die Erreichung des Gesamtprojekterfolges notwendig werden.

**Projekt:** Systemdienstleistungen für den sicheren Betrieb des Energieversorgungssystems: Momentanreserve mit Hochleistungsbatterien - ReserveBatt -

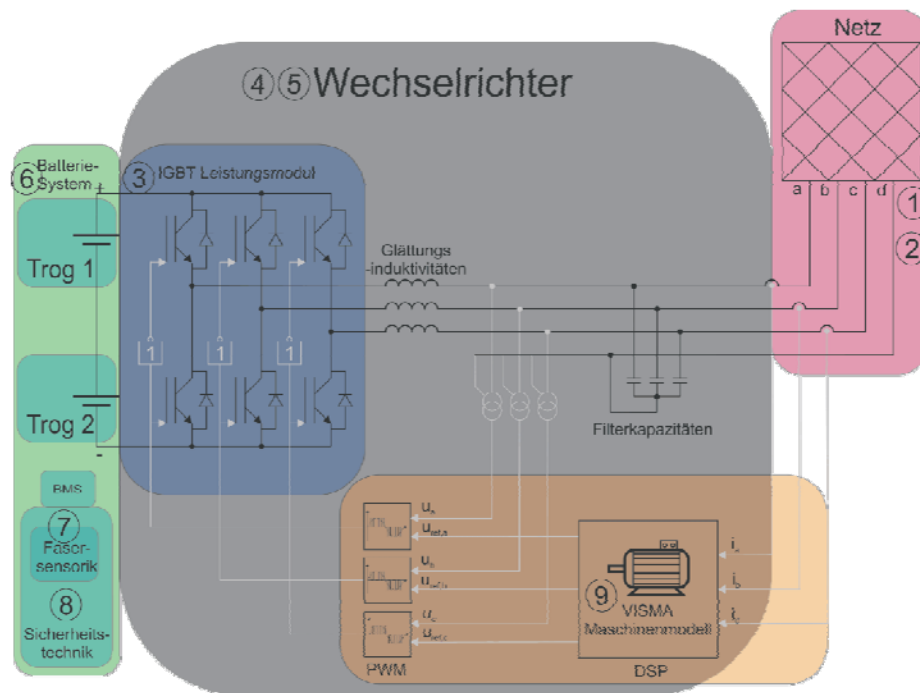


Abbildung 2: Darstellung der Arbeitsbereiche der Projektpartner im Gesamtsystem

Folgende Komponenten und Arbeitspakete sind Teil des Gesamtsystems bzw. des Projektes: Auf der Netzseite sind die Netzanschlussbedingungen und mögliche Präqualifizierungsvorschriften (AP1) für die Erbringung von Momentanreserveleistung genauer zu definieren. Hierzu spielt auch das Netzmonitoring (AP2) eine große Rolle. Das IGBT-Leistungsmodul – ILM (AP3) wird mit einer speziellen Steuerelektronik (AP4) in das Gesamtsystem des Wechselrichters überführt (AP5). Für das speziell zu entwickelnde Hochleistungs-Batteriesystem (AP6) werden zur Analytik faseroptische Sensoren (AP7) und neueste Sicherheitstechnik (AP8) verwendet. Die spezielle Steuerung (AP9) wird simulatorisch für Batterie (AP10), Wechselrichter (AP9) und Gesamtsystem (AP11) nachgebildet. Außerdem wird eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (AP12) zur Bewertung des Gesamtsystems stattfinden.

**Projektpartner:**

- Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut, Faseroptische Sensorsystemen (HHI-FS)
- AKASOL GmbH
- Infineon Technologies AG
- Stöbich technology GmbH
- Wolfsburg AG
- LTI ReEnergy GmbH
- Tennet GmbH, HarzEnergie Netz GmbH (assoziiert)

---

|                             |  |   |
|-----------------------------|--|---|
| <b>Projektlaufzeit:</b>     | 01.06.2017 - 31.05.2020  |   |
| <b>Gefördert durch:</b>     | Bundesministerium für Wirtschaft und Energie   |   |
| <b>Projektkoordination:</b> | Dr.-Ing. R. Benger<br>benger@iee.tu-clausthal.de   | (Tel:05321/3816-8067)   |
| <b>Bearbeiter:</b>          | Lennart Beushausen, M. Sc.<br>Ibe10@tu-clausthal.de<br>Dipl.-Ing. Frank Deblon<br>frank.deblon@efzn.de<br>Julian Gollenstede, M. Sc.<br>julian.gollenstede@tu-clausthal.de | (Tel:05321/3816-8065)<br><br>(Tel:05321/3816-8063)<br><br>(Tel:05321/3816-8065) |
| <b>Projektleiter:</b>       | Prof. Dr.-Ing. H.-P. Beck<br>info@iee.tu-clausthal.de  | (Tel: 72-2570)  |



Abbildung: Die Teilnehmer der “ReserveBatt”-Auftaktveranstaltung am 28. Juni 2017  
(Foto EFZN)

## **4 Personelle Besetzung**

### **4.1 Hauptamtliche Mitarbeiter des Instituts**

|   |  |
|---|--|
| Hochschullehrer:<br>(Institutsdirektor) | Prof. Dr.-Ing. H.-P. Beck<br><br>Prof. Dr.-Ing. M. Faulstich   |
| Wissenschaftlicher Direktor:            | Dr.-Ing. E.-A. Wehrmann  |
| Honorarprofessor:                       | Prof. Dr. rer. nat. H. Wenzl, Prof. Maubach,<br>Prof. Baake, Prof. Lülff   |
| Wiss. Assistent:                        | Dr.-Ing. D. Turschner<br>Dr. Ing. R. Bengner   |
| Wissenschaftliche Mitarbeiter:          | Dipl.-Ing. A. Bentaleb (Austritt 09/16)<br>L. Beushausen, M. Sc.<br>Dipl.-Ing. N. Ell (Austritt 03/2016)<br>S. Fiebrich, M. Eng. (Austritt 08/16)<br>J. Gollenstede, M. Sc.<br>A. Hashemifarzad, M. Sc.<br>Dr.-Ing. R. Heyne (Austritt 08/16)<br>Ch. Klaas, B. Sc.<br>N. Kreth, M. Sc.<br>Dipl.-Wirtsch.-Ing. K. Koring<br>Dipl.-Ing. A. Oberland<br>Dipl.-Wirtsch.-Ing. I. Ryspaeva (Austritt 09/16)<br>Dipl.-Ing. R. Schnieder (Austritt 03/17)<br>Dipl.-Ing. B. Schwake (Austritt 12/16)<br>Dipl.-Ing. V. Spielmann<br>Dipl.-Ing. E. Tchoupou Lando |

M. Thiele, M. Eng.  
K. Tkalcec, M. Sc.  
Dipl.-Ing. A. Ufkes  
Dipl.-Ing. B. Werther (Austritt 06/2016)

Externe Doktoranden:

Becker, Andreas (Powersolution)  
Bedrunka, Alexander (Hochschule Hannover)  
Fiebrich, Stefan (EFZN)  
Haslbeck, Matthias (OTH Regensburg)  
Ranaweera, Chaminda (Cutec)  
Schmicke, Christian (Hochschule Hannover)  
Werther, Benjamin (Powersolution)

MitarbeiterInnen im Technischen  
und Verwaltungsdienst (MTVD):

Frau C. Schönemann  
Frau Zugehör  
Herr J.-N. Gebhardt  
Herr M. Kirchner  
Herr I. Lührig  
Herr K. ter Smitten  
Herr M. Buchholz (Auszubildender)  
Herr M. Gieseler (Auszubildender)  
Herr F. Hesse (Auszubildender)  
Herr D. Holzapfel (Auszubildender, Aus-  
tritt 01/17)  
Herr K. Maib (Auszubildender)

## Personal des Institutes für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme



H.-P. Beck  
(Direktor)  
-2570



M. Faulstich  
(Lehrstuhl für  
Umwelt-und  
Energietechnik)



E.-A. Wehrmann  
(Wiss. Direktor)  
-2595



D. Turschner  
(Wiss. Assistent)  
- 2592



R. Bengel  
(Wiss. Assistent)  
  
- 05321/3816  
8067



S. Zugehör  
(Sekretariat)  
  
- 2299



A. Bentaleb  
(chem. WiMa)



L. Beushausen  
(WiMa, Speicher-  
systeme)  
- 05321/3816-  
8161



N. Ell  
(chem. WiMa)



S. Fiebrich  
(chem. Stipendiat)



J. Gollenstede  
(WiMa, Speicher-  
systeme)  
- 3821



A. Hashemifarzad  
(WiMa, Energie-  
systemanalyse)  
- 933-349

Mitarbeiterinnen / Mitarbeiter

Telefon: 05323/72-





R. Heyne  
(ehem. WiMa)



Ch. Klaas  
(WiMa, Virtuelle  
Synchronmaschi-  
ne)  
- 2929



K. Koring  
(WiMa, Speicher-  
systeme)  
  
05321/3816-8101



N. Kreth  
(WiMa, Elektr.  
Verteilnetze)  
  
- 3597



A. Oberland  
(WiMa, Batterie-  
systeme)  
-05321/3816-  
3720



I. Ryspaeva  
(ehem. WiMa)



R. Schnieder  
(ehem. WiMa)



B. Schwake  
(ehem. WiMa)



V. Spielmann  
(WiMa, Batterie-  
systeme)  
  
- 3736



E. Tchoupou Lando  
(WiMa, Batterie-  
systeme)  
  
- 2572



M. Thiele  
(WiMa, Speicher-  
systeme)  
-05321/3816-  
8161



K. Tkalec  
(WiMa, Energie-  
systemanalyse  
305321/3816-  
8001)





A. Ufkes  
(WiMa, Netze)  
- 2594



B. Werther  
(ehem. WiMa)



M. Buchholz  
(Auszubildender)  
-2940



J.-N. Gebhardt  
(Elektronik)  
-3839



M. Gieseler  
(Auszubildender)  
- 2940



F. Hesse  
(Auszubildender)  
- 3839



D. Holzapfel  
(ehem.Auszu-  
bildender)



M. Kirchner  
(Elektronik)  
- 3839



I. Lührig  
(Energietechnik)  
- 2571



K. Maib  
(Auszubildender)  
- 2940



C. Schönemann  
(Techn. Zeich-  
nerin)  
- 2177



K. ter Smitten  
(Mechanik)  
- 2571

Mitarbeiterinnen / Mitarbeiter

Telefon: 05323/72-

## **4.2 Honorarprofessuren und Lehrbeauftragte**

|                                       |  |
|---------------------------------------|--|
|                                       | Lehrgebiete:   |
| Prof. Dr.-Ing. E. Baake               | Lehrgebiet Theorie Elektromagnetischer Felder            |
| Dr.-Ing. R. Bengel<br>(ab WS 2016/17) | Batteriesystemtechnik und Brennstoffzellen               |
| Dr.-Ing. Buddenberg                   | Fossile und regenerative Energieressourcen               |
| Dipl.-Ing. H. Darrelmann              | Autonome Netze   |
| Dr. rer. nat. W. Faber                | Energiesysteme: Kapitelteil Kernbrennstoffe              |
| Dr.-Ing. J. Heldt                     | Sonderprobleme Elektrischer Maschinen                    |
| Dr. Ing. J. Jahn                      | Regenerative Elektrische Energietechnik                  |
| Prof. Dr.-Ing. J. Kühl                | Regenerative Energiequellen                              |
| Prof. Dr.- Ing. G. Lülß               | Optimierung und Instandhaltung von Elektroenergieanlagen |
| Prof. Dr.-Ing. K.-D. Maubach          | Elektrizitätswirtschaft                                  |

## **4.3 Wissenschaftliche Hilfskräfte**

|                      |                   |                    |
|----------------------|-------------------|--------------------|
| Frau J. Brockschmidt | Herr F. Keßler    | Herr Th. Settgest  |
| Herr M. Dossou       | Herr Ch. Klaas    | Frau H. Stelmaszyk |
| Frau M. Dreher       | Herr N. Kreth     | Herr J. Wecken     |
| Frau L. Freiburger   | Frau H. Lang      | Frau J. Weiß       |
| Frau A.-K. Fries     | Frau A. Moeske    |                    |
| Herr D. Er           | Herr N. Orazov    |                    |
| Herr R. Griemert     | Herr T. Reichrath |                    |
| Herr M. Hartleb      | Herr S. Reineke   |                    |
| Herr T. Jordan       | Herr Rohde        |                    |

#### **4.4 Mitgliedschaften in wissenschaftlichen Vereinigungen und in den Selbstverwaltungsgremien der Universität**

- |                           |   |
|---------------------------|---|
| Prof. Dr.-Ing. H.-P. Beck | <ul style="list-style-type: none"><li>- Vorstandsvorsitzender des Energieforschungszentrums Niedersachsen (01.02.2008-30.09.2017)</li><li>- DFG-Gutachter</li><li>- AiF-Gutachter</li><li>- Member of the International Scientific Committee for Electrical Power Quality and Utilisation</li><li>- Ordentliches Mitglied der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft</li><li>- ordentliches Mitglied der acatech (Akademie für Technikwissenschaften e. V.)</li><li>- Mitglied in der Niedersächsischen Regierungskommission, Runder Tisch Energiewende</li><li>- Gutachter der Bayerischen Forschungstiftung</li><li>- Gutachter der Baden Württemberg Forschungstiftung</li><li>- Mitherausgeber der Hütte Springer Verlag 2016</li><li>- Leiter Projekt "Restrukturierung elektrischer und elektronischer Werkstätten der TUC"</li><li>- Vorstandsmitglied des CUTEC-Instituts (ab 01.08.2017)</li><li>- Studiengangsverantwortlicher En, EST</li><li>- Koordinator TUC-Schwerpunkt Nachhaltige Energiesysteme</li><li>- Gutachter Landgericht Hamburg</li></ul> |
| Dr.-Ing. E.-A. Wehrmann   | <ul style="list-style-type: none"><li>- Mitglied der Kommission zum wissen. Fehlverhalten</li><li>- Projekt "Restrukturierung elektrischer und elektronischer Werkstätten der TUC"</li></ul>  |
| Dr.-Ing. D. Turschner     | <ul style="list-style-type: none"><li>- Mitglied der Jury bei "Jugend forscht"</li><li>- Mitglied des internationalen Programmkomitees "International Conference on Renewable Energy and Power Quality ICREPQ"</li></ul>  |

Matthias Kirchner                      - Projekt “Restrukturierung elektrischer und elektronischer Werkstätten der TUC”

Ingo Lührig                              - Projekt “Restrukturierung elektrischer und elektronischer Werkstätten der TUC”

## **5        Links**

- [www.tu-clausthal.de](http://www.tu-clausthal.de)
- [www.iee.tu-clausthal.de](http://www.iee.tu-clausthal.de)
- [www.efzn.de](http://www.efzn.de)

## **6        Anlagen**

Die Anlagen sind in der angegebenen Reihenfolge eingebunden

Anlage 1                      Ressourcen des Institutes

# Institut für Elektrische Energietechnik

## Ressourcen des Institutes

- |   |                                 |                     |
|---|---------------------------------|---------------------|
| ● | Verfügbare Gebäudefläche        | 1670 m <sup>2</sup> |
|   | -Bürofläche                     | 826 m <sup>2</sup>  |
|   | -Labor-/Prüffeldfläche          | 794 m <sup>2</sup>  |
|   | -Büros und Labor (EFZN Goslar)  | 100 m <sup>2</sup>  |
| ● | Mitarbeiter (Stand Ende 2017)   |                     |
|   | -wissenschaftliches Personal    | 15                  |
|   | -techn.-/Verwaltungsangestellte | 10                  |
|   | -Lehrbeauftragte                | 9                   |
|   | -Wissenschaftliche Hilfskräfte  | 22                  |
|   | -externe Doktoranden            | 7                   |
|   |                                 | <hr/>               |
|   |                                 | 63                  |
- 
- Prüffeld mit
    - Maschinen-/Antriebslabor
    - Energieelektroniklabor
    - Hochspannungs-/Energieanlagenlabor
    - Prüfstände für Walzwerks-, Bahn- /Schredder-Antriebe mit Umrichter
    - Batterie-Prüfstand mit Impulslade / -entladegerät und Impedanzspektrometer
    - Prüfstand für Windkraftanlagen zur Getriebeprüfung
    - Schleudergrube
    - Brennstoffzellen-Versuchseinrichtung, Elektrolyseur
  - Labor elektrische Verteilnetze (Multi-VISMA), 2 Synchronmaschinen-/Asynchronmaschinensätze Netznachbildungen, Nachbildung Umrichternetzeinspeisung, EFZN
  - Speicherlabor (EFZN), Batterien, DC-Sammelschiene 750 V, Schwungrad , Rapercup
  - Prozeßrechner-/Simulationstechniklabor: Digitale Signalprozessor - Einschübe, CIP-Pool
  - MATLAB-Simulink, SABER, PSPICE, PowerFactory, Integral